

Bridge Management System (BMS)の 実橋への適用に関する研究

宮本文穂¹・中村秀明²・山岡健一³・河村 圭⁴

¹知能情報システム工学科

²知能情報システム工学科

³東洋情報システム

⁴大学院理工学研究科博士後期課程システム工学専攻

本研究室では、従来より橋梁の維持管理が包括的に実行できる橋梁維持管理支援システム「Bridge Management System (以下BMS)」の開発を行ってきた。現段階までに開発したシステムは、劣化診断機能、劣化予測機能、維持管理計画最適化機能などを有している。これらの機能を用いることにより、本BMSは、橋梁維持管理支援システムとして、かなり実用性の高い段階に近づいてきている。本研究では、本BMSの実用性をさらに高め、実際に使えるシステムとするため、現在開発中のBMSの検証と問題点の抽出を行った。その際、実際に供用されている山口県下の橋梁に対して本BMSを適用し、さらに専門技術者を対象とするアンケート調査の結果と比較することによりシステムの出力結果について検討を行った。

Key Words : Bridge Management System(BMS), maintenance, repair, strengthening, bridge rating, life cycle cost, inspection

1. 緒言

構造物にとって重要なことは、力学的に十分な強度と剛性を保つことであり、そのためには、構造物の各部分が釣り合いのとれた安全性を保つことと、それらが高い耐久性を有することが要求される。コンクリート構造物は、これらの条件を満たしている構造物として数多く建造され、鋼構造物のように一定期間ごとに塗り替えを行う必要がないメンテナンスフリーな構造物として考えられてきた。しかし、近年になって、適切な維持管理が行われていない場合、コンクリート構造物も劣化が進むことが明らかとなり、維持管理の重要性が認識され始めている。

日本では、1950年代から始まった全国規模での道路交通網の整備により、多くのコンクリート橋梁が建設されてきた。しかし、建設時から50年近く経過した現在では、橋梁自体の老朽化や周辺環境の変化に伴い、また、道路構造令の改正に伴う活荷重の増大などにより、設計時に考慮した状態よりも厳しい供用状態のもと、塩害や中性化、アルカリ骨材反応などの化学変化などにより材料が劣化しているものなど、早急に何らかの維持管理対策が必要な橋梁が増えてきている¹⁾。

また、我が国では、少子化、高齢化が進んでおり、そのため生産年齢人口が減少する事態が起きている。このような状況の中、平成9年度建設省関係予算では、平成8年度末の公債残高が約241兆円程度と主要先進国中最悪という危機的状況にある。こうした状況から政府は、財政構造改革推進についての閣議決定を行い、公共投資については、公共投資基本計画の計画期間の延長などが決められ、今世紀中の集中改革においては、各予算水準を引き下げることになっている²⁾。したがって、既存の橋梁の維持管理に割り当てることのできる予算にも限界があることは明白である。つまり、維持管理対策が必要な橋梁に対して、無計画に順次対策を施していくと、老朽橋梁の維持管理費用が、新橋梁の建設に必要な予算を圧迫することが考えられる。しかし、一方では、本格的高齢者社会の到来を目前に控え、社会資本の充実を推進する必要があることも事実である。

このようなことから、限られた予算を最大限に活かした包括的な橋梁維持管理を支援できるシステム(Bridge Management System)が近年注目されている³⁾。このようなシステムに要求される機能としては、現在の橋梁の状態を正確に診断できること、橋梁のライフサイクルを考慮した長期的な視野での維持管理の最適化を行い、維持管

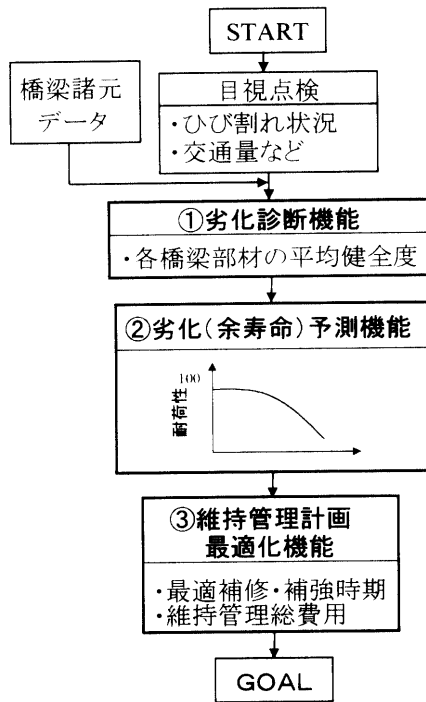


図-1 システムのフロー図

理対策の選定および費用の見積もりができること、などがあげられる。

このような背景の下で、本研究室では、橋梁維持管理支援システム「Bridge Management System (以下BMS)」の開発を行ってきた。現段階までに本BMSは、劣化診断機能、劣化予測機能、維持管理計画最適化機能を有している。劣化診断機能は、「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 (以下ES)」を用い、専門技術者の推論過程を診断プロセスとして階層化し、各プロセスごとにニューラルネットワークと双方向連想記憶を組み合わせたファジィ推論システムを構築することで専門技術者の持つ主観的あいまいさの取扱いを可能にしている⁴⁾。また、ニューラルネットワークの誤差逆伝播法による知識更新も付加している。また、劣化予測機能は、橋梁の状態を表す指標として耐荷性および耐久性を定義して、橋梁の余寿命予測が行えるようになっている。そして、維持管理計画最適化機能では、遺伝的アルゴリズム (以下GA) を用いて、評価指標を経済性および品質としたときの最適な維持管理計画を高速に求めることが可能となっている⁵⁾。これらの機能を用いることにより、本BMSは、橋梁維持管理支援システムとして、かなり実用性の高い段階に近づいている。そこで、本BMSの実用性をさらに向上させ、実際に使えるシステムとするため、本システムを山口県下で実際に供用されている橋梁に適用し、システムが有する各機能の出力結果と専門技術者へのアンケート結果と比較することによりシステムの有効性を検証した。

2. 本BMSの構築と特徴

(1) 本BMSの特徴

BMSの目標とするところは、各国で数多く提唱されているが³⁾、その適用範囲はあまりにも広いものであり、これらをシステムとして全て構築しようとするとは非常に複雑になることは明白であり、これらを全て含むシステムを構築することは事実上不可能である。したがって、システムを構築する際には、システム化の範囲を明確にし、全体像を示す必要がある。本BMSは、補修または補強が行われていない既存のRC橋梁を対象としており、これらの橋梁の劣化診断や劣化予測、経済性および品質を考慮した上で橋梁が予定供用年数を満たすことができる維持管理計画の作成が可能なシステムの構築を行った。システムのフロー図を図-1に示す。

本BMSでは、まず対象橋梁について点検を行う。点検は目視点検程度のものを主としており、ひび割れ状況、環境条件、交通量、ひび割れ幅といった定性的および定量的データ、さらには橋梁諸元データが入力される。次に、橋梁各部材の劣化診断 (図-1中の①) が行われる。劣化診断機能については、これがシステムに備わっていないければ、対象橋梁における現在の劣化状態の把握が行えず、有効な維持管理指針を示すことはできない。この劣化診断を行う方法としては、2通りの方法が考えられている。一つは、劣化診断を行うことのできる専門家の知識と経験に全てをゆだねる方法で、この方法の長所は、実際の橋梁の状態から大きくはずれることなく信頼性が高いということであり、短所は、維持管理の対象となる橋梁は、年々増加しているのに対して、専門家の数が圧倒的に足りなくなっているところである。もう一つの方法としては、部材の劣化の変遷を遷移マトリックスを用いて表現して劣化状況を推測する方法である。この方法は、時間が経過するにつれて推測した劣化状況と実際の劣化状況が食い違う危険性を含んでいる。本BMSでは、従来より本研究室で開発してきたESを劣化診断機能として導入している。このシステムは、専門家の持つあいまいさを含む知識をシステムに取り込んでおり、目視点検程度の情報から、対象橋梁の現在の劣化状況を診断できるシステムである。この機能の出力は各橋梁部材の劣化程度の5段階評価および平均健全度である。さらに、劣化予測機能 (②) によって、床版および主桁の劣化予測および余寿命予測を行う。ここで、劣化予測手法としては、劣化診断機能から出力される「耐荷性」と「耐久性」の「平均健全度」を用いて、橋梁各部材の経年劣化を示す「予想劣化曲線」を定式化し、劣化予測を行っている⁶⁾。次に本BMSでは、対象橋梁をある期間維持管理していく上で、経済性および品質を考慮した維持管理計画を策定する機能として、維持管理計

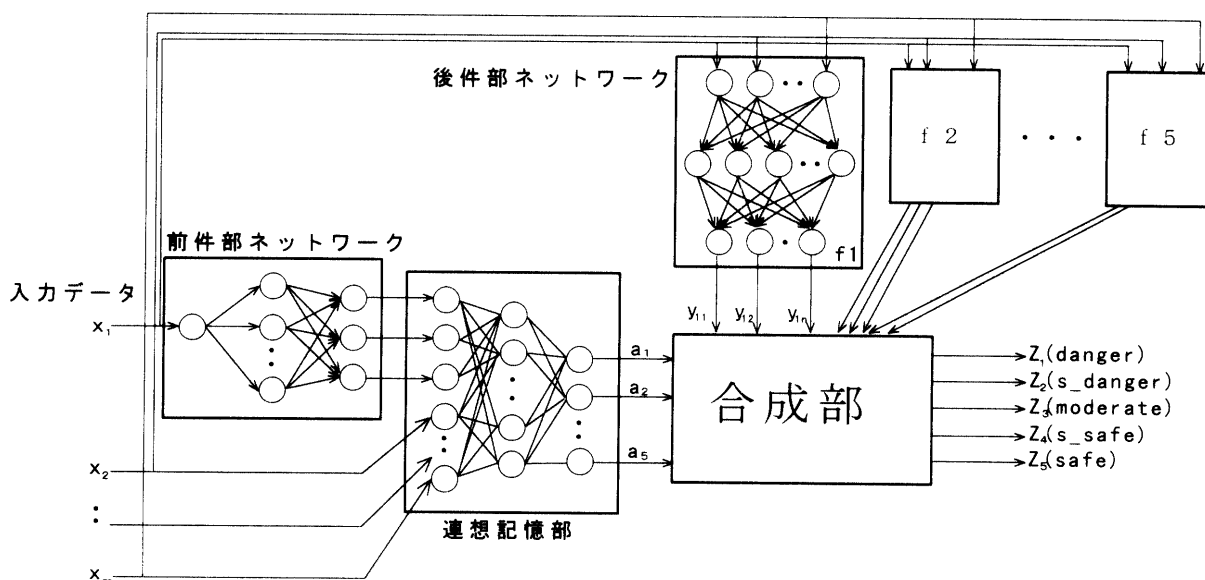


図-3 推論機構の概念図

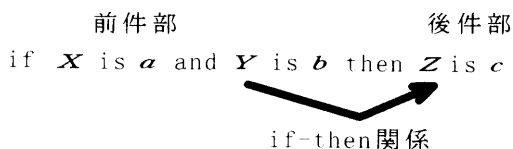


図-2 if-then ルール

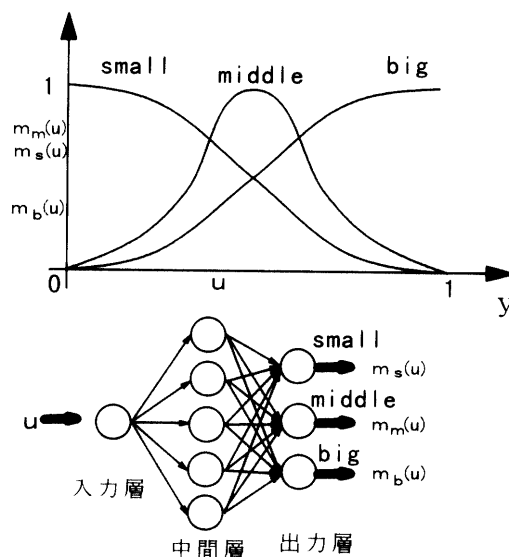


図-4 前件部ネットワーク

画最適化機能 (3) を構築している。これは、先に述べた劣化診断機能により現在の状態を把握した上で、将来における部材の劣化予測を行い、経済性および品質の面で最適な維持管理計画を提示する機能である。この機能では、橋梁に対する維持管理対策を「補修」と「補強」に区分し、これらが橋梁各部材に及ぼす影響をもとに補修・補強を行った後の予想劣化曲線に対する影響を定量化することで、将来の橋梁の状態を予測し、最適な維持管理計画を提示することを可能にしている³⁾。また、維持管理計画の最適化は、非常に組み合わせ数の多い組み合わせ最適化問題となるので、その最適化手法には、GAを用い高速にその近似最適解を探索している。

(2) 劣化診断機能

a) 知識表現

本機能では、橋梁診断における専門技術者の経験的な診断および評価知識を式(1)に示すようなif-thenルールの形で記述し、ファジィ推論を行う。

$$\begin{aligned}
 \text{Rule 1: } & \text{if } (X_{11} \text{ is } a_{1r}) \text{ and } \dots \text{ and } (X_{1r} \text{ is } b_{1r}) \text{ then } Z_1 \text{ is } c_1 \\
 & \vdots \\
 \text{Rule n: } & \text{if } (X_{nr} \text{ is } a_{nr}) \text{ and } \dots \text{ and } (X_{nr} \text{ is } b_{nr}) \text{ then } Z_n \text{ is } c_n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここで、X は入力、Z は出力、a,b,c はファジィ変数

である。

本機能では、図-2 のように if-then ルールを分割し、if-then ルールの前件部および後件部を非線形関数が同定可能な3層ニューラルネットワークを用いて表現し、両者を結びつける if-then 関係に当たる部分に連想記憶を行うネットワークである双方向連想記憶(BAM : Bidirectional Associative Memory)を適用している⁴⁾。

b) 推論機構

本システムの推論機構の概念図を図-3 に示す。本機能では診断対象橋梁の橋梁諸元、環境条件、交通量、各ひび割れの状態といった定量的および定性的データが入力することにより、各 subgoal ごとに danger, slightly

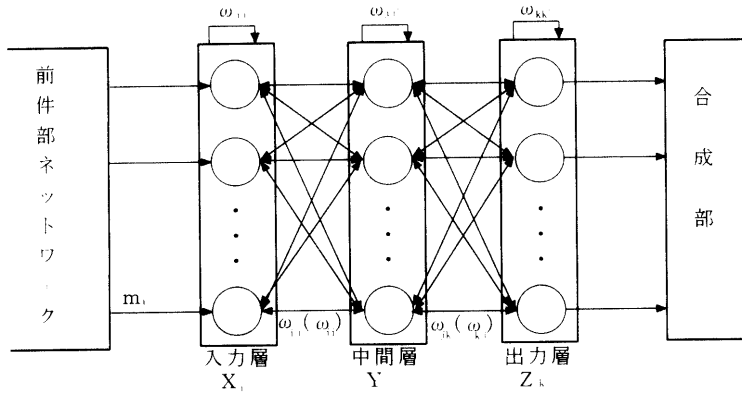


図-5 双方向連想記憶

danger, moderate, slightly safe, safe の5段階に属する程度および平均健全度を出力している。

推論機構は前件部ネットワーク、連想記憶部、後件部ネットワーク、合成部からなっている。前件部ネットワークと後件部ネットワークにニューラルネットワークを用いることで専門家が持っている知識を更新することや連想記憶部に双方向連想記憶を用いることでファジィ推論を可能にしていることが特色である。

前件部ネットワークは図-4 に示すような3層のニューラルネットワークで構築される。このネットワークは前件部のファジィ変数を記憶し、入力データに従いファジィ変数のメンバーシップ関数のグレード、つまり前件部ファジィ命題の合致度を求めるようになっている。

連想記憶部では前件部ネットワークで求めた前件部ファジィ命題の合致度より、各ルールに対する重みを求める。連想記憶部は図-5 に示すように入力から出力までの関係において双方向結合を含む離散時間形式で構築されており、その推論動作は式(2)に従うものとした。

$$\left. \begin{aligned}
 X_i(t+1) &= f\left(m_i + \sum_j w_{ij} + \sum_j w_{ji}(t)Y_j(t)\right) \\
 Y_j(t+1) &= f\left(\sum_i w_{ij}X_i(t+1) + \sum_i w_{ji}Y_j(t) + \sum_k w_{jk}Z_k(t)\right) \\
 Z_k(t+1) &= f\left(\sum_j w_{jk}Y_j(t+1) + \sum_k w_{kk}Z_k(t)\right) \\
 X_i(0) &= f(m_i) \\
 Y_j(0) &= f\left(\sum_i w_{ij}X_i(0)\right) \\
 Z_k(0) &= f\left(\sum_j w_{jk}Y_j(0)\right)
 \end{aligned} \right\} (2)$$

$X_i(t)$: 時刻 t における入力層ユニットの出力,
 $Y_j(t)$: 時刻 t における中間層ユニットの出力,
 $Z_k(t)$: 時刻 t における出力層ユニットの出力,
 $w_{i,i}$: 入力層ユニットー入力層ユニット間の結合重み,
 $w_{j,j}$: 中間層ユニットー中間層ユニットの結合重み,
 $w_{k,k}$: 出力層ユニットー出力層ユニット間の結合重み,

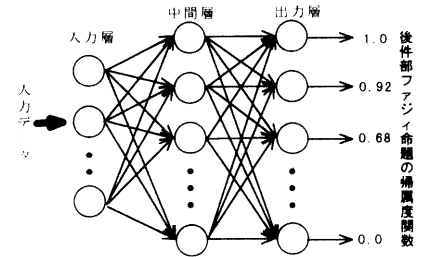
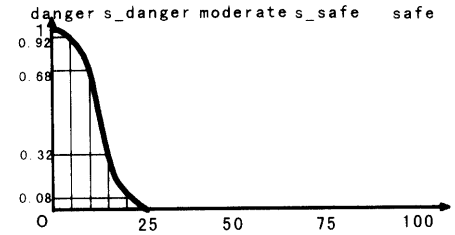


図-6 danger を表す後件部ネットワーク

w_{ij} (w_{ji}) : 入力層ユニットー中間層ユニットの結合重み,

w_{jk} (w_{kj}) : 中間層ユニットー出力層ユニット間の結合重み,

m_i : 前件部ネットワークにより求められた前件部ファジィ命題の合致度.

ここで、 $f(\cdot)$ は本システムでは次式(3)で表されるシグモイド関数を用いている。

$$f(x) = \frac{1}{\{1 + \exp(-x)\}} \quad (3)$$

本機能では診断対象橋梁の橋梁諸元、環境条件、交通量、各ひび割れの状態といった定量的および定性的データが入力される。連想記憶部には、定量的データは前件部ネットワークを通り、前件部ファジィ命題の合致度が入力される。一方、定性的データはそのまま連想記憶部の入力層へ入力されるようになっている。連想記憶部ではこれらの入力から入力層ー中間層および中間層ー出力層の2つの BAM において時間の経過に伴いルールが想起されていく。ここで、連想記憶部が複数のルールから適切な1つを選択するための状態遷移を起こすために、ある程度の時間がかかる。ゆえに、平衡状態に到達するまでのある時刻には、複数のルールが活性化しているといえる。

そこで、本機能ではネットワークが平衡状態に到達するまえの時点で出力値を取り出すことにより、入力値との適合度を反映した複数のルールに対する重み(出力値)を得ることが可能となる。このことがファジィ推論を可能にしているといえる⁷⁾。

一方、後件部ネットワークは、図-6 に示すような3層ニューラルネットワークで構築されており、後件部ファ

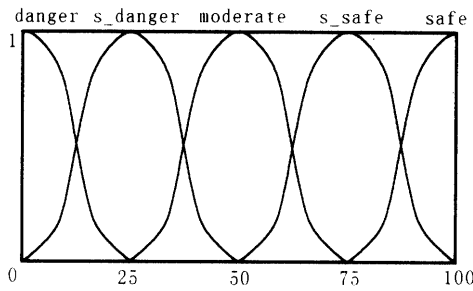


図-7 5段階評価の判定用メンバーシップ関数

ジイ命題の状態を表すメンバーシップ関数を求める。後件部ネットワークでは5つのネットワークを用意しそれぞれ danger, slightly danger, moderate, slightly safe, safe のメンバーシップ関数を0~100まで5点きざみで21分割したものを出力するようになっている。

このように前件部ファジイ命題から連想記憶部を通して後件部ファジイ命題に関する推論が順次行われ、合成部において連想記憶部から算出された後件部の重みと後件部からの出力を順次合成してメンバーシップ関数 Z_j を求めていく (式(4)参照)。

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i y_{ij}}{\sum_{i=1}^5 a_i} \quad (j = 1, 2, \dots, 21) \quad (4)$$

ここで a_i は i 番目の後件部の重みを表し、 y_{ij} は i 番目の後件部ネットワークの出力を表す。

これに図-7の判定用メンバーシップ関数を照合することにより5段階評価を算出し、さらにそれらの重心をとることにより平均健全度を求める。このような操作を繰り返すことによって各 subgoal ごとの最終的な推論結果が得られることになる。

(3) 劣化予測機能

この機能は、橋梁の劣化の状態を表す指標として、耐荷性、耐久性の2つの指標を定義して、劣化診断機能より出力される耐荷性および耐久性の平均健全度から、予想劣化曲線を導出して、今後の劣化の進行状況と余寿命を求める機能である

a) 予想劣化曲線

予想劣化曲線を合理的に定義するために、コンクリート構造物の劣化機構を図-8のようなはり構造を例として考えてみる。このようなはり構造は、鉄筋やコンクリートといった各種材料から構成され、適切な示方書に基づいて種々の劣化外力に抵抗できるように設計される。すなわち、構成材料は、塩分の浸透、二酸化炭素との接触などの劣化外力に対して、また、構造体としては、自

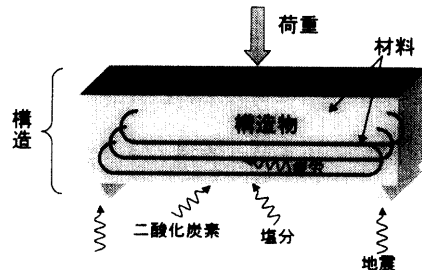


図-8 はり構造の材料構成と劣化外力の例

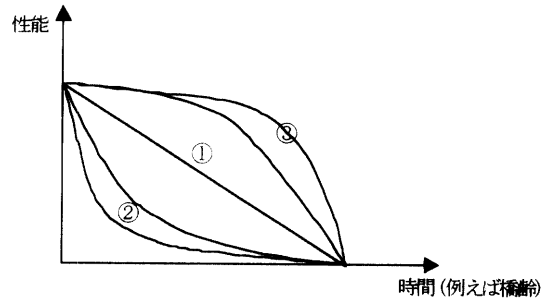


図-9 構造物の劣化過程のグラフ

動車荷重、地震荷重などの劣化外力に対してそれぞれ長期間にわたって抵抗できるようになっている。これらの劣化外力は、構成材料あるいは構造体を劣化させる「外力」として同一範疇に入れられる場合が多いが、主として材料劣化に関連するものおよび構造劣化に関連するものに分けて考えることもできる。このように考え、ここでは、構造材料および構造体それぞれに対する劣化程度を表す指標として「耐久性」と「耐荷性」を定義する。これら2つの指標は、本BMSでは、材料劣化に対する抵抗性を耐久性という指標で表わしており、構造体の耐荷力低下に関する指標を耐荷性という指標を用いて表わしている。

ここで、コンクリート構造物の劣化過程について考えると、適切に設計、施工された構造物は、まず、建設直後より劣化外力に応じた材料劣化が生じ(耐久性の低下)、その後、構造体の劣化に関連する外力によって構造全体としての耐荷機構に変状が生じる(耐荷性の低下)結果、何らかの対策が必要な状態に至るものと考えられる。つまり耐久性と耐荷性は、本来は相互に関連させて考えるべきであるが、これら2つを関連させて考えるとあまりにも複雑になるので、一般的なコンクリート構造物の劣化機構を考える場合、各種劣化外力に対応させて耐荷性と耐久性を独立ものとして取り扱うことができるものと仮定する。

次に、このような構造物がたどる劣化過程を時間軸で表すことを考える。縦軸には、構造物の性能を表す指標である耐荷性および耐久性をとり、横軸には時間をとる。描かれる劣化過程のパターンとしては次の3パターンが考えられる。

- ① 性能が時間とともに線形的に下がっていく場合、
- ② 初期段階で性能が急激に下がる場合、
- ③ ある時点から、性能が急激に下がる場合。

これらを模式的に図示すると図-9 となる。

ここで、図中の①および②の曲線を見てみると、①は、時間とともに性能が一定の割合で劣化する過程を表しており、②は、供用開始直後に性能が急激に下がり、あるところまで下がるとその後は、あまり下がらなくなる過程を表している。これら2つの劣化曲線は、実構造物の劣化現象と異なっていると考えた。一方、③の曲線は、対象とする劣化機構を比較的合理的に表す曲線、すなわち、先に材料性能が低下し、次いでに耐荷力性能が低下するという劣化過程を良く表しているものと考え、以下、この曲線を予想劣化曲線として採用した。なお、以上のような考えに従えば、各種構造物に対する維持管理対策である「補修工」、「補強工」の要否判定指標として、上述の「耐久性」、「耐荷性」がうまく利用可能となる。

b) 劣化予想曲線式の導出⁶⁾

ここで、実際に予想劣化曲線式を仮定して式の導出方法を定義する。耐荷性に関しては、今のところ明確なデータはないものの過去の実橋床版および主桁に関するデータにより、おおよそ4次曲線に近いカーブを描く傾向が見られることから⁸⁾、時間に関する4次関数と仮定した。また、耐久性に関しては、耐荷性より次数が1次少ない(微係数)という考え方が一般的であり、合理性があると考えられるため、3次関数と仮定した。

劣化診断機能の出力である耐荷性、耐久性の各平均健全度をそれぞれ S_L 、 S_D とすると、予想劣化曲線は耐荷性については式(5)に示す橋齢 t についての4次関数、耐久性については式(6)に示す3次関数で表せるとした。

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

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

なお、耐荷性・耐久性の各平均健全度は供用開始時点の値 ($b_{L(0)}$ 、 $b_{D(0)}$) を100に設定し、その後の経年劣化によって0になったときに維持管理の限界に達したとみなし、架換えが必要になると仮定した。

本BMSでは維持管理対策(補修、補強)を行うと予想劣化曲線は何らかの影響を受けるとしている。この維持管理対策後の予想劣化曲線は上述した式(5)と式(6)をもとに次のように定義した。

供用開始時点から劣化診断機能により診断を行った現時点までの予想劣化曲線を式(7)および式(8)とおく。

$$f_{(i)}(t) = b_{L(i)} - a_{L(i)} t^4 \quad (7)$$

$$g_{(i)}(t) = b_{D(i)} - a_{D(i)} t^3 \quad (8)$$

ここで $b_{L(i)}$ 、 $b_{D(i)}$ は供用開始時点で橋梁の持っている耐荷性、耐久性の初期値である。次に i 回目の維持管理対策(補修および補強)を行った後の予想劣化曲線を式(9)および式(10)とおく。

$$f_{(i)}(t) = b_{L(i)} - a_{L(i)} t^4 \quad (9)$$

$$g_{(i)}(t) = b_{D(i)} - a_{D(i)} t^3 \quad (10)$$

式(7)~(10)の各定数は、 $b_{L(0)}$ および $b_{D(0)}$ については先に述べたようにそれぞれ100とし、劣化診断機能により診断した時点 t' 年とするとその年の耐荷性の平均健全度 $f_{(0)} t'$ と耐久性の平均健全度 $g_{(0)} t'$ は S_L 、 S_D とわかっているため、これを利用して $a_{L(0)}$ 、 $a_{D(0)}$ を求めることができ、対象橋梁の劣化状況を示す予想劣化曲線を求めることができる。

(4) 維持管理計画最適化機能⁵⁾

a) 橋梁に対する維持管理対策

本機能を構築するにあたって、橋梁に対する各工法を「補修」と「補強」のカテゴリーに区分して整理した。本研究での補修と補強についての定義の概略は、前述のように「補修」は耐久性の劣化に対する処置、「補強」は耐荷性の劣化に対する処置としている。つまり、「補修」を行えば、耐久性が向上し、「補強」を行えば、耐荷性が向上することになる。この定義を基に本BMSで考慮した橋梁部材である床版および主桁それぞれに対して用いられている代表的な工法をリストアップして、その特徴から、補修、補強に区分したものをまとめた。次に実際に考慮される補修・補強の組み合わせを1つの維持管理対策としてとらえ、床版および主桁に対する維持管理対策をそれぞれ表-1 および表-2 に示すように整理した。なお、表中のコードについては、後述する。

b) 補修・補強計画のモデル化

既存橋梁の補修・補強計画を最適化するには、多くのことを考慮しなければならない。その指標として、考慮すべきものは、経済性の他に、安全性、機能性、環境性などが考えられ、それらを考慮に入れた計画が真に最適な計画であると言える。しかし、それらを全て考慮に入れることは、実際問題として非常に困難であるため、本機能では、経済性と品質指標の2つを考慮した。ここで、経済性とは、橋梁の維持管理に実際に必要な費用を最小化すること、すなわち、補修・補強費用と定期点検費用の合計の最小化を目的とした。橋梁の品質には、多くの考え方があがるが、本機能においては、耐久性と耐荷性の2つの指標を考慮したものを橋梁の品質指標として採用した。すなわち、品質指標としては、劣化診断機能で診断した時点から予定供用年数までの各年時における耐久性と耐荷性の平均健全度の合計を用いた。

表-1 維持管理対策のコーディング (床版)

コード	床版の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
0010	FRP4 枚(鋼板)接着+樹脂注入 or FRP4 枚(鋼板)接着+樹脂注入+断面修復
0100	FRP2 枚接着+樹脂注入 or FRP2 枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	縦桁増設
1011	縦桁増設+樹脂注入 or 縦桁増設+樹脂注入+断面修復
0111	床版増厚
1001	床版増厚+樹脂注入 or 床版増厚+樹脂注入+断面修復
0011	床版打換え
Others	補修・補強をしない

表-2 維持管理対策のコーディング (主桁)

コード	主桁の維持管理対策
0110	樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
1000	ガラスクロス+樹脂注入 or ガラスクロス+樹脂注入+断面修復
1101	モルタル吹付け+樹脂注入 or モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復
0010	FRP4 枚(鋼板)接着+樹脂注入 or FRP4 枚(鋼板)接着+樹脂注入+断面修復
0100	FRP2 枚接着+樹脂注入 or FRP2 枚接着+樹脂注入+断面修復
1100	外ケーブル
0111	外ケーブル+樹脂注入 or 樹脂注入+断面修復
1001	外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入 or 外ケーブル+ガラスクロス+樹脂注入+断面修復
0011	外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入 or 外ケーブル+モルタル吹付け+樹脂注入+断面修復
Others	補修・補強をしない

	補修・補強計画			
橋齢	t	t+1	t+2	...
対策	④	①	②	...

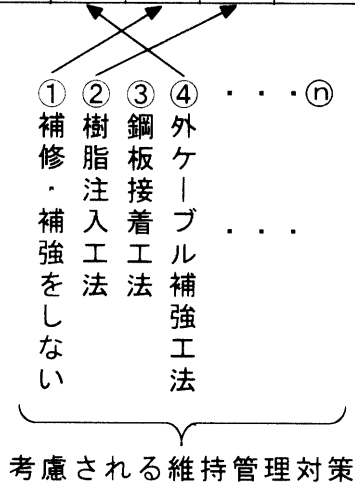


図-10 補修・補強計画のモデル化

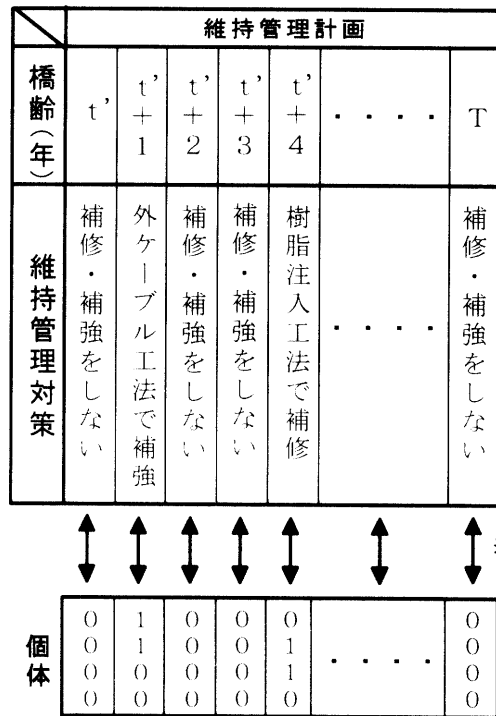


図-11 補修・補強計画のコーディング例

表-3 実際に用いたGAのパラメータ

項目	パラメータの値, 手法
個体数	30
世代数	300
突然変異確率	10%
選択手法	トーナメント方式+ エリート保存法式
交叉手法 (交叉率)	1点交叉 (100%)
終了条件	世代交代が世代数に 達したら終了

また、補修・補強計画の最適化は、図-10に示されるように、経年ごとに考慮される数種類の維持管理対策を「いつ、どのような組み合わせで行えば最も効率よく維持管理を行っていきけるか」という組み合わせ最適化問題としてモデル化することができる。このように、本機能では、既存橋梁の補修・補強計画の最適化を、多目的な組み合わせ最適化問題としてとらえ、最適化を行った。その組み合わせ最適化問題の解法としては、GAを用いて計算を行った。

c) 維持管理対策のコーディング

GAにおける解の探索は、個体という記号列を用いて行うため、対象の問題を個体の形に置き換える（コーディングする）必要がある。そこで、まず既存橋梁に対する各補修・補強工法を整理し、それらの組み合わせである維持管理対策を整理した。その結果、主桁では10通り、床版では9通りの維持管理対策があり、どちらも2進数で表現しようとする4bit必要となる。このとき、4bitで表現可能な数は、16通りであり、主桁では6通り、床版では7通りの致死遺伝子を持つ個体が発生してしまう。そこで、実際の維持管理計画では、他の対策に比べて、「補修・補強をしない」が頻りに選択されることを考慮して、余りのコードは全て「補修・補強をしない」であるとした。また、突然変異の手法として個体の中からランダムに1bit選択し、その値を反転する方法を用いているため、ある維持管理対策が、突然変異後に変わりうる対策は、ハミング距離が1である4つだけなので、コードとの対応付けにも気をつけなければならない。以上のことから主桁、床版それぞれの維持管理対策を表-1および表-2のように4bitのコードに対応づけた。

また、維持管理の対象となる期間は現時点から予定供用年数までで、対策の有無は、毎年考慮するので、1つの補修・補強計画は維持管理対策を列で表し、それを並べた補修・補強計画を行って表現した2次元配列状の個体として構成した。補修・補強のコーディング例を図-11に示す。

d) 最適化のアルゴリズム

本研究で考慮した最適化指標は、経済性と品質指標

の2つであるが、これら全く異なる指標を同時に最適化することは非常に困難であるため、これを多目的な最適化問題として「 ϵ -制限⁹⁾法」を組み合わせ多段階に最適化を行った。以下にそのアルゴリズムを述べる。

Step 1: まず、経済性（費用）だけを考慮に入れて総費用の最小化を目的とした最適化を行う。この場合の目的関数と制約条件は以下のように定義できる。

目的関数：

$$F = \sum_{t=t'}^{T-1} C_{jt} \rightarrow \text{Min} \quad (11)$$

制約条件：

$$\left. \begin{array}{l} f(t) > 0 \\ g(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{array} \right\} \quad (12)$$

ここで、 t ：橋齢（年）

j ：行う対策の種類（ $j=1\sim 9$ or 10）

t' ：現在の橋齢（年）

T ：予定供用年数（年）

$f(t)$ ：橋齢 t 年における耐荷性の平均健全度

$g(t)$ ：橋齢 t 年における耐久性の平均健全度

C_{jt} ：橋齢 t 年に行う維持管理対策 j および定期点検を行うために必要な費用

である。維持管理対策 j の種類は、主桁または床版のどちらの部材についての最適化を行うかによって異なり、主桁の場合は10通り、床版の場合は9通りの対策を考慮している。Step 1で求めた補修・補強計画に必要な費用をCost 1として記憶しておく。

Step 2: 次に品質の最大化を目的とした最適化を行う。

品質指標を含めた場合の目的関数は、上記の目的関数で、最適化した際に求めたCost 1を参考にして、橋梁管理者が望む許容範囲内である上乗せ予算 α を決め、Cost 1と α の合計を総費用の上限として定める。Step 2での目的関数および制約条件は、

目的関数：

$$F = \sum_{t=t'}^{T-1} \{f(t) + g(t)\} \rightarrow \text{Max} \quad (13)$$

制約条件：

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{t=t'}^{T-1} C_{jt} \leq \epsilon \\ f(t) > 0 \\ g(t) > 0 \\ 0 < t < T \end{array} \right\} \quad (14)$$

ここで、 ϵ は、Cost 1と α の合計である。

Step 3: Step 2の上乗せ予算額 α を変化させてStep 2を

表-4 専門技術者による床版の診断結果

橋齢	43年	58年	41年	31年	31年	32年	42年	42年	29年
橋梁名	Ha橋①	Ni橋⑥	No橋①	Mi橋①	Mi橋③	Ge橋③	To橋①	To橋②	O橋②
判定項目									
床版設計	57.1	52.8	48.3	60.0	59.2	62.5	80.0	75.8	76.7
床版施工	73.6	52.1	44.2	45.0	48.3	56.5	79.2	76.7	77.5
路面状態	75.0	55.0	45.0	65.8	70.8	30.8	81.7	76.7	73.3
床版供用状態	80.7	55.0	50.0	65.8	68.3	37.5	83.3	79.2	73.3
床版材料劣化	77.1	40.7	63.3	51.7	53.3	74.2	80.8	80.8	81.7
ハンチ沿いのひび割れ	85.7	31.4	83.3	42.5	37.5	72.5	85.0	85.8	89.2
支点付近のひび割れ	87.9	65.0	85.0	60.0	66.7	73.3	90.8	90.8	89.2
床版中央のひび割れ	87.1	36.4	78.3	68.3	68.3	69.2	85.0	85.0	76.7
床版の全体的損傷	80.0	40.7	65.0	49.2	45.0	67.5	85.8	85.8	82.5
床版耐荷性	75.0	45.0	44.2	51.7	54.2	64.2	81.7	81.7	80.0
床版耐久性	80.0	45.0	50.0	46.7	50.0	58.3	84.2	82.5	82.5
床版耐用性	72.9	42.9	45.8	47.5	52.5	61.7	82.5	83.3	80.8

表-5 専門技術者による主桁の診断結果

橋梁名	Ha橋①	Ni橋⑥	No橋①	Mi橋①	Mi橋③	Ge橋③	To橋①	To橋②	O橋②
判定項目									
主桁設計	59.3	47.9	58.3	75.8	75.0	77.5	70.8	60.8	78.3
主桁施工	55.0	31.4	62.5	75.0	73.3	72.5	71.7	53.3	74.2
主桁供用状態	72.1	47.1	59.2	82.5	85.0	85.0	75.8	73.3	76.7
主桁材料劣化	48.6	47.9	75.0	72.5	74.2	87.5	77.5	62.5	85.0
曲げひび割れ	75.0	37.1	73.3	80.0	75.8	87.5	81.7	72.5	75.0
せん断ひび割れ	92.9	67.9	87.5	95.8	95.8	98.3	92.5	97.5	98.3
鉄筋腐食ひび割れ	40.7	45.7	86.7	87.5	75.0	92.5	73.3	53.3	75.8
付着ひび割れ	90.0	80.7	95.0	91.7	90.0	94.2	93.3	93.3	93.3
主桁の全体的損傷	55.7	37.1	77.5	76.5	74.2	87.5	75.0	64.2	80.0
主桁耐荷性	67.1	35.7	70.0	76.7	76.7	81.7	70.0	63.3	81.7
主桁耐久性	55.0	35.0	69.2	78.3	75.8	85.8	71.7	56.7	81.7
主桁耐用性	62.9	33.6	66.7	75.0	70.8	85.0	71.7	60.8	81.7

繰り返すことで、橋梁管理者と対話的に様々な補修・補強計画を提示する。

GAの手法には、様々なアルゴリズムが提案されているが、本BMSは今後単体橋梁だけでなく、橋梁網全体系での維持管理計画の最適化を行うことを考えており、GAの機構を複雑化すると今後の機能の拡張が困難になると考えられるため、単純GAを採用した。実際に計算に用いたGAの各パラメータを表-3に示す。これらのパラメータは幾度かの試行錯誤により決定したのもである。なお、世代数による終了条件では、真の最適解に近づく保証はないが、本システムでは、上述した最適化アルゴリズムで補修・補強計画の策定を数回繰り返し、その内の最良解を採用することで満足な解を得ている。

3. 本BMSの実橋への適用

(1) 専門技術者へのアンケート調査と橋梁の目視点検

a) アンケート調査および橋梁目視点検の目的

このアンケート調査の目的は、本BMSの各機能の実用性を検証するためのデータを収集すること、劣化診断機能の学習時の教師データを得ることである。また、橋梁の目視点検は、システムに入力するための点検データを収集することである。また、この点検結果は、専門技

術者がアンケート調査票に回答を記入していくときの資料としても用いる。

b) 調査方法

橋梁に対する目視点検およびアンケート調査は、2日間に渡り、山口県周辺の建設コンサルタント会社(4社)に勤務する専門技術者7名(2日目6名)を対象として行った。調査日程は、1日目午前に調査についての説明を行い、午後より、F土木建築事務所管轄の2橋梁2スパンの目視点検を行った。2日目の午前には、M土木事務所管轄の2橋梁3スパンの目視点検を行い、午後より、T土木事務所管轄の3橋梁4スパンの目視点検を行った。調査対象の橋梁は、7橋梁9スパンである。

アンケート調査に用いた調査票は、1スパンにつき、目視点検に用いる点検表1部(8枚)、点検時に気になったことを書き留めるための橋梁のモデル図1部(1枚)、劣化診断機能の教師データ、劣化予測機能および補修・補強選定機能の検証データを得るための調査票1部(10枚)の合計3部である。

点検表の回答形式は、0点~1点まで0.1刻みで11段階の得点および複数回答の中から一つを選択してチェックする形式と数字を記入する形式である。なお、専門技術者以外が回答しても変わらない質問、例えば、信号の有無、横桁の有無などはあらかじめ記入しておいた。調

表-6 床版耐久性の余寿命

年数	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内			FG	C	CF	F				
11~20年		FG	ABDE	ABDF	ABD	ABCDE	ABDF	BF	BDF	DF
21~30年		AC	C	E	E		C	ACD	AC	AB
31~40年		BE					E	E	E	C
40年以上		D								E

表-7 床版耐荷性の余寿命

年数	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内		D	DFG	CD		F	D			
11~20年		FG	ABE	ABF	BD	ABDE	ABF	BDF	BDF	DF
21~30年		AC	C	E	ACF	C	C	AC	AC	AB
31~40年		BE			E		E	E	E	C
40年以上										E

表-8 主桁耐久性の余寿命

年数	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内		CD	ACDFG	D		D	D		D	
11~20年		AG	BE	ABC	BD	B	B	ABD	AB	
21~30年		F		F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABDF
31~40年		BE		E	E		CE	CE	E	C
40年以上										E

表-9 主桁耐荷性の余寿命

年数	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内		D	ADFG			D	D			
11~20年		AG	BE	ABCD	BD	B	B	ABD	ABD	D
21~30年		CF	C	F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABF
31~40年		BE		E	E		CE	CE	E	C
40年以上										E

査票の回答形式は、劣化診断機能で用いる教師データを得る質問については、0点~100点まで5点刻みで得点をチェックする形式を取っている。また、劣化予測機能を検証するためのデータを得る質問は、こちらで設定した年数の範囲、例えば、10年未満、11年~20年などのどの範囲に属するかを選択してチェックする形式である。補修・補強工法についての質問は、自由回答形である。

c) アンケート調査の結果と考察

アンケート調査の結果を表-4および表-5にまとめて示す。ここでは、床版および主桁について専門技術者が診断を行い、各項目に付けた点の平均点を示す。なお、橋梁名の丸付き数字は、スパン番号を表している。

床版の診断結果を見ると「Ni 橋」が最も悪く、「To 橋」が最も健全であると診断されたことがわかる。

悪い評価の橋梁からみていくと「Ni 橋」は、この7橋の中で最も高い橋齢であり、材料劣化、全体的損傷に低い評価が下された。ひび割れに関する判定項目は、ハンチ浴いおよび床版中央付近では30点台であり、他の橋梁に比べてかなり低い評価となっている。これらのことか

ら、耐久性の評価が低くなっていると考えられる。他の橋梁では、「Ge 橋」が、路面の状態が特に低い評価となっており、それに伴って、床版供用状態の評価が悪くなったと思われる。「No 橋」は、設計および施工に問題があったようで、評価は低いものだった。これらの橋梁について、実際に目視を行った状況と比べると、「Ni 橋」は、床版中央に亀甲状にひび割れが発生しており、ひび割れに関する判定項目の評価が低かったことは、実際の状況と合っている。また、「Ge 橋」および「No 橋」についても、実際の状況と合った診断結果が示されている。

評価の良い橋梁では、「To 橋」が第一、第二スパンともかなりよい評価となっており、実際の目視の状況とも合っている。

主桁の診断結果では、「Ni 橋」が最も悪く、「Ge 橋」が最も良いと診断された。「Ni 橋」の評価は、鉄筋腐食ひび割れの判定項目以外すべて7橋中最も低い結果になっている。鉄筋腐食ひび割れは、「Ha 橋」が最も悪かった。「Ge 橋」は、床版の路面の状態および供用状態では最低得点であったが、主桁診断では、ほとんどの判定項

表-10 専門技術者データ

	立場	扱う橋梁の種類	携わっている年数 (年)
A	設計者	鋼橋	21~30
B	設計者	(不明)	5~10
C	設計者	コンクリート橋, 鋼橋	21~30
D	設計者	コンクリート橋, 鋼橋	~3
E	設計者	コンクリート橋, 鋼橋	11~20
F	管理者	コンクリート橋, 鋼橋	21~30
G	設計者	コンクリート橋, 鋼橋	5~10

表-11 床版における専門技術者の補修・補強工法選定結果

橋梁名	補修・補強工法の必要性	維持管理対策 (補修・補強工法)
Ha 橋	無	
Ni 橋	有	樹脂注入, FRP接着, 鋼板接着
No 橋	無	
Mi 橋①	有	パテ, フレックド [®] コンクリート
Mi 橋③	有	パテ, フレックド [®] コンクリート
Ge 橋	無	
To 橋①	無	
To 橋②	無	
O 橋	無	

表-12 主桁における専門技術者の補修・補強工法選定結果

橋梁名	補修・補強工法の必要性	維持管理対策 (補修・補強工法)
Ha 橋	有	パテ, フレックド [®] コンクリート
Ni 橋	有	パテ, FRP接着, 鋼板接着
No 橋	無	
Mi 橋①	無	
Mi 橋③	無	
Ge 橋	無	
To 橋①	無	
To 橋②	有	パテ, フレックド [®] コンクリート
O 橋	無	

目で最高点を得ている。主桁についても、実際の目視の状況と比較してみると、専門技術者の診断は実際の橋梁の状況と合っていることがわかる。

次に、表-6~表-9に専門技術者による床版耐久性および耐荷性、主桁耐久性および耐久性からみた橋梁の余寿命予測の結果を示す。ただし、表中のA~Gは、実際にアンケート調査を行った専門技術者を示しており、橋梁に接するときの立場、扱っている橋梁の種類、携わっている年数の順で表にまとめると表-10のようになる。

専門技術者に対して、コンクリート橋梁について安全であると感じる橋梁を調査したところ、個人の主観によって多少の差異はあるものの安全であると感じる橋梁は、おおよそ50年であり、危険であると感じる橋梁は、70年くらいであった。このことから、専門技術者は、コンクリート橋梁の寿命については、50年~70年くらいを基準としていることが分かる。しかし、診断を行った橋梁

の余寿命調査の結果からは、対象橋梁の現在の橋梁に専門技術者が判断した余寿命を加えた年数がこの50年~70年に必ずしも当てはまるとは言えなかった。これは、この基準は、架設場所の環境や交通量などの条件をあまり考慮せずに回答したものであるからだと思われる。

そこで、対象橋梁の現在の橋梁は考えずに診断結果の判定項目において耐荷性および耐久性の点数と余寿命の関係についてみると余寿命が10年以内には、診断結果で40点以下、11年~20年以内には、40点~60点、21年~30年以内には、60点以上の橋梁が選択される傾向があった。

次に補修・補強の必要性に関するアンケート調査結果を示す。対象橋梁を見て維持管理対策が必要と判断された橋梁については、補修・補強工法を表-11および表-12に示す。

「Ha 橋」は、主桁に鉄筋露出・腐食がみられることか

表-13 劣化診断機能を用いた床版診断結果

判定項目	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
床版設計		79.7	39.6	38.3	60.2	61.3	59.7	77.4	46.2	38.0
床版施工		51.6	63.5	70.0	60.0	54.3	51.1	61.1	61.7	70.2
路面状態		70.8	72.2	60.9	48.3	67.3	33.5	76.7	76.5	58.4
床版供用状態		62.4	67.6	63.4	61.9	65.2	60.5	71.2	71.8	54.0
床版材料劣化		75.3	56.0	79.6	55.7	57.4	75.3	75.6	76.5	68.8
ハンチ沿いひび割れ		83.3	32.4	83.8	33.0	51.6	85.9	83.4	83.2	82.5
支点付近のひび割れ		85.9	62.7	86.5	56.7	88.8	88.8	85.3	85.3	85.6
床版中央のひび割れ		82.8	51.8	70.6	44.8	66.6	61.9	83.4	83.4	90.1
床版の全体的損傷		76.4	51.0	73.5	50.8	68.1	81.2	75.3	75.4	74.6
床版耐荷性		86.8	54.1	65.3	53.5	57.3	72.1	77.6	58.1	61.8
床版耐久性		66.9	47.7	66.9	46.1	56.1	73.8	71.0	71.7	66.3
床版耐用性		81.4	50.8	60.3	48.4	50.9	71.7	77.6	62.8	61.6

表-14 劣化診断機能を用いた主桁診断結果

判定項目	橋梁名	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
主桁設計		69.1	60.8	60.5	68.4	69.8	71.4	67.4	64.2	56.7
主桁施工		65.2	43.4	75.9	68.5	68.7	61.9	62.0	71.5	68.5
主桁供用状態		70.1	74.2	73.2	83.3	82.0	67.9	69.6	70.1	69.5
主桁材料劣化		50.1	39.1	78.3	64.6	68.3	71.2	76.7	38.4	72.9
曲げひび割れ		58.9	32.7	58.2	79.6	81.4	78.9	79.1	84.4	82.3
せん断ひび割れ		92.2	95.0	92.7	91.7	91.7	91.4	92.1	91.5	91.4
鉄筋腐食ひび割れ		49.5	46.8	84.3	84.1	65.2	82.4	89.0	40.1	73.9
付着ひび割れ		91.6	92.6	91.0	91.4	91.6	91.0	91.2	91.2	91.2
主桁の全体的損傷		53.4	49.9	84.7	75.6	73.5	80.4	84.3	37.6	81.8
主桁耐荷性		52.8	64.3	73.5	91.4	91.6	65.0	64.3	51.7	55.3
主桁耐久性		49.9	57.6	84.2	71.7	68.5	74.8	79.9	44.0	78.1
主桁耐用性		50.9	64.8	78.7	73.8	76.5	69.3	75.4	49.9	68.3

らパテ工法およびプレバックドコンクリート工法が選択された。

「Ni 橋」は、床版には、ひび割れが多いことと強度不足が考えられることから樹脂注入工法と鋼板または FRP 接着工法が選択され、主桁には鉄筋露出部分にパテ工法、曲げひび割れが多くみられることから鋼板または FRP 接着工法が選択された。

「No 橋」は、床版および主桁には、補修・補強の必要性はないと判定された。

「Mi 橋」は、床版に漏水、遊離石灰、ひび割れが多いこととコンクリートのかぶり不足による鉄筋の露出から、パテ工法およびプレバックドコンクリート工法が選択された。

「Ge 橋」は、路面に凹凸があるので舗装改修が選択された。また、この橋梁は拡幅を行っており、その新旧の継ぎ目から漏水、遊離石灰がみられることから、グラウト注入工法が選択された。床版および主桁に関しては、補修・補強の必要性はないと判定された。

「To 橋」は、主桁の一部で鉄筋が露出していることから、パテ工法およびプレバックドコンクリート工法が選択された。また、この橋梁は、拡幅を行っており、その新旧の継ぎ目から漏水、遊離石灰がみられることから、グラウト注入工法が選択された。

「O 橋」は、補修・補強の必要はないとされた。

今回点検を行った橋梁では、損傷箇所は見られるものの専門技術者からは、ほとんどが早急に補修・補強工法を必要としないとの判断を得た。

(2) 本BMSの実橋への適用と検証

この節では、本BMSに目視点検で得られたデータを実際に入力して、各機能からそれぞれ出力された結果と前節で示した調査結果とを比較することによって、本BMSの実用性を検証していく。

a) 劣化診断機能

劣化診断機能から出力された床版および主桁の診断結果を表-13および表-14に示す。これらの結果は、劣化診断を行う橋梁以外の橋梁を学習データとして用いて学習を行い、変更された学習後の重みを用いて出力させたものである。入力に用いたデータは、実橋目視点検を行った専門技術者全員の平均を用いた。また、学習時に教師データとしたのは、専門技術者全員の診断結果の平均である。

アンケート調査の結果と比較してみると「Mi 橋」の①、③スパン、「To」の①スパンなどは、アンケート結果に近い出力が得られている。しかし、「Ni 橋」は、判定項目の各点数の傾向は、アンケート結果と比較的一致して

表-15 余寿命

橋梁名 余寿命	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
床版耐久性 (年)	19	13	18	7	9	18	21	21	12
床版耐荷性 (年)	28	12	12	6	7	12	19	11	7
主桁耐久性 (年)	11	19	34	16	14	18	29	8	19
主桁耐荷性 (年)	8	17	16	26	26	9	12	8	6

表-16 床版耐久性からみた余寿命

橋梁名 年数	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内		FG	C	C	F				
11~20年	FG	ABD	ABD	ABD	ABCDE	ABD	BF	BDF	
21~30年	AC	C	E	E		C	ACD	AC	AB
31~40年	BE					E	E	E	C
40年以上	D								E

表-17 床版耐荷性からみた余寿命

橋梁名 年数	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内	D	DFG	CD		F	D			
11~20年	FG	ABE	AB	BD	ABDE	ABE	BEF	BEF	DF
21~30年	AC	C	E	ACF	C	C	AC	AC	AB
31~40年	BE			E		E	E	E	C
40年以上									E

表-18 主桁耐久性からみた余寿命

橋梁名 年数	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内	CD	ACDFG	D		D	D		D	
11~20年	AG	BE	ABC	BD	B	B	ABD	AB	
21~30年	F		F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABDF
31~40年	BE		E	E		CE	CE	E	C
40年以上									E

表-19 主桁耐荷性からみた余寿命

橋梁名 年数	Ha 橋①	Ni 橋⑥	No 橋①	Mi 橋①	Mi 橋③	Ge 橋③	To 橋①	To 橋②	O 橋②
10年以内	D	ADFG			D	D			
11~20年	AG	BE	ABC	BD	B	B	ABD	ABD	D
21~30年	CF	C	F	ACF	ACEF	AF	F	CF	ABF
31~40年	BE		E	E		CE	CE	E	C
40年以上									E

※表中の網掛けは以下のことを表す

- ： 専門技術者による診断結果の耐荷性および耐久性の平均健全度から
予想劣化曲線を用いて算出した余寿命
- ： 劣化診断機能から出力された耐荷性および耐久性の平均健全度から
予想劣化曲線を用いて算出した余寿命
- ： と の両方が重なっている

いるものの、全体的に評価が良くなり多少異なる結果となっている。これは、「Ni 橋」だけが他の橋梁に比べて損傷を受けていて、ニューラルネットワークの学習の時に与えられたデータが、比較的健全な橋梁のデータのみであったためと考えられる。したがって、今後、同じような損傷状態にある橋梁を数多く用いて、学習していけば、信頼性は向上していくものと思われる。

主桁の診断結果においても、Mi 橋①、③スパンがアンケート結果にかなり近い結果を出力している。床版と同様に「Ni 橋」が全体的に評価が良くなり多少異なる結果となっている。また、「To 橋」②スパンは、「主桁耐久性」が、アンケート結果に比べてかなり下がっているが、本機能への入力において「鉄筋腐食ひび割れ」に関する項目の「ひび割れ幅」が4.8mmとかなり悪かったことや「鉄

表-20 床版維持管理計画（費用最小化）Ni 橋⑥ 品質指標：8830

実施年（年）	維持管理対策	費用（U）
2005	床版打換え工法	45.0
	点検	32.0
		77.0

表-21 床版維持管理計画（費用上限：150U）Ni 橋⑥ 品質指標：9537

実施年（年）	維持管理対策	費用（U）
2000	床版増厚工法、断面修復工法、樹脂注入工法	72.4
2007	床版打換え	45.0
	点検	32.0
		149.4

表-22 床版維持管理計画（費用最小化）Mi 橋①

実施年（年）	維持管理対策	費用（U）
2003	床版打換え工法	45.0
2030	樹脂注入工法	23.8
2054	断面修復→樹脂注入工法	33.6
	点検	60.0
		162.4

筋腐食状況」の評価が悪かったために、「主桁材料劣化」の評価を下げ、その上位サブゴールである「主桁の全体的損傷」の評価が下がったためと思われる。

劣化診断機能は、ニューラルネットワークの学習に用いる橋梁の損傷状態の分布によって、信頼性が左右されるが、橋梁のサンプル数を増やしていくことでその問題は解消されると思われる。

b) 劣化予測機能

劣化診断機能によって診断された橋梁の耐荷性および耐久性の診断結果を用いて、劣化予測機能から出力された余寿命予測の結果を表-15に示す。

本機能からは、表-15のように年数が出力されるが、アンケート調査では10年間を一つの範囲としてどこに余寿命が属するかを調査した。以下の表-16～表-19は、そのアンケート調査結果と劣化診断機能の診断結果を用いた余寿命予測、専門技術者による診断結果を用いて余寿命予測を行った結果を示す。

耐久性および耐荷性の余寿命予測についてみてみると、診断機能の診断結果を用いたものも専門技術者による診断結果を用いたものも比較的アンケート調査の結果と合致しているといえる。「Mi 橋」①、③スパンについては、専門技術者の診断結果および劣化診断機能の出力結果から予想劣化曲線を用いて算出した余寿命が両方ともアンケート調査の結果とあまり合致しているといえない。しかし、診断結果をみてみると橋齢の割に耐久性および耐荷性の健全度が低く評価されていることから、本機能の余寿命予測方法を用いると余寿命が専門技術者の感覚より、かなり短く評価されてしまうと考えられる。また、余寿命の評価の方法において、専門技術者は床版および

主桁の全体を見て判断していると考えられる。しかし、本BMSに入力する項目は、損傷の一番厳しいところを見て入力しており、本機能においても橋梁の損傷が一番厳しいところで余寿命を判断していることになる。したがって、専門技術者が回答した余寿命より若干厳しい結果として出力されることは十分考えられる。以上のことを考慮すると、専門技術者による診断結果と、劣化診断機能の出力結果である耐久性および耐荷性の平均健全度を用いて計算した余寿命予測の結果を全体的にみれば、専門技術者が持つ余寿命の感覚に比較的うまく合致していたといえる。

従って、本機能の劣化予測手法は、橋梁の劣化診断後に専門家が判断する余寿命に近いものを推定できるといえる。

c) 維持管理計画最適化機能

劣化予測機能により出力された予測結果を用いて、維持管理計画の最適化を行った。対象としたのは、床版については、専門技術者へのアンケート調査の結果から何らかの維持管理対策が必要とされた「Ni 橋⑥」と「Mi 橋①」である。主桁については、同様の理由から、「Ni 橋⑥」および「To②」について行う。予定供用年数は、各橋梁とも100年とした。

床版の維持管理計画の最適化を行った結果を表-20～表-22に示す。主桁については、表-23～表-25に示す。

「Ni 橋」については、費用最小化とともに品質最大化を行った結果を示す。表中の実施年は、維持管理対策を実施する年を西暦で示しており、維持管理対策は、実施する補修・補強工法を示している。そして、費用は、維持管理対策に必要な費用を記しており、費用の単位U(Unit)

表-23 主桁維持管理計画（費用最小化）Ni 橋⑥ 品質指標：4234

実施年 (年)	維持管理対策	費用 (U)
2004	断面修復工法, 樹脂注入工法	33.6
2015	モルタル吹付け工法, 樹脂注入工法	33.6
2018	樹脂注入工法	23.8
	点検	52.0
		143.0

表-24 主桁維持管理計画（費用上限200U）Ni 橋⑥ 品質指標：9505

実施年 (年)	維持管理対策	費用 (U)
2002	FRP 2 枚 or 鋼板接着工法, 樹脂注入工法	97.6
2013	モルタル吹付け工法, 樹脂注入工法	33.6
2018	樹脂注入工法	23.8
	点検	36.0
		191.0

表-25 主桁維持管理計画（費用最小化）To 橋②

実施年 (年)	維持管理対策	費用 (U)
2000	FRP 2 枚 or 鋼板接着工法, 樹脂注入工法	97.6
2005	モルタル吹付け工法, 樹脂注入工法	33.6
2026	モルタル吹付け工法, 樹脂注入工法, 断面修復工法	43.4
2038	樹脂注入工法	23.8
	点検	60.0
		258.4

は、 $1U = \text{¥}1,000/\text{m}^2$ と換算するものとする。

床版に対する維持管理計画についてみると、表-20 は、必要費用の最小化を条件として、予定供用年数 100 年とした時の「Ni 橋⑥」における維持管理計画を示したものである。ここで、「Ni 橋⑥」は劣化診断機能の出力を見ると耐荷性より耐久性の評価が悪く、床版の全体的損傷の評価も悪い。専門技術者へのアンケート調査の結果では、樹脂注入工法、鋼板接着工法、FRP 接着工法が選択されていた。専門技術者は、交通規制が容易であり、床版の損傷が打換えでなければ回復しそうでないとき以外は、床版打換えは選択しない。本機能では、交通規制など施行する際に考慮しなければならない条件がある場合もそれを考慮していない。従って、本機能からの出力としては、最も効果的で必要な費用が少ない床版打換えが選ばれた。表-21 は、表-20 の計画に費用を上乗せして、品質を最大にする条件で策定した維持管理計画である。この計画では費用の上限を 150U とした。この計画では、まず床版増厚工法を用いて補強をしている。その後、床版打換えを行っている。費用最小化で、最適な維持管理計画を策定した場合「Mi 橋①」においても床版打換えが選択された。本機能における床版打換えは、他の工法に比べて、効果が高く必要な費用が低いために選ばれやすいと考えられる。この点は、今後、床版打換えを行うときには、交通規制に必要な費用を上乗せするか、交通規制が可能かどうかをあらかじめ入力させるなどの方法を

とり、GA で選ばれにくくしないと現実の維持管理計画とはかけ離れていると思われる。

主桁に対する維持管理計画についてみていく。表-23 は、必要費用の最小化を条件として、予定供用年数 100 年まで供用できるための「Ni 橋⑥」における維持管理計画を示したものである。費用最小化を条件としたこの計画では、補修を中心として選ばれている。これは、主桁の耐荷性より耐久性の健全度評価が低かったことを考慮すると妥当であると思われる。また、この計画に費用を上乗せして、費用の上限を 200 とした場合、表-24 に示すとおり、FRP 2 枚 or 鋼板接着工法が選ばれ、品質指標も向上している。鋼板接着工法は、専門技術者も推奨していた工法である。従って、早い時期にこの工法を行うことは、実際の維持管理にあっていると考えられる。表-25 には、「To 橋②」において最適化指標を費用最小化としたときの維持管理計画が示されている。「To 橋②」は、表面保護と補修工法が中心に選択されている。専門技術者が選択した工法も補修工法を選択していたので、この計画は概ね妥当であると考えられる。

4. 結言

本研究は、現在開発中の BMS の検証と問題点の抽出のため、山口県内で実際に供用されている橋梁に本システムを適用するとともに、橋梁を点検する専門技術者に

対して、アンケート調査を実施し、本システムの出力結果の有効性を検証したものである。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- ① 橋梁点検の専門技術者を対象とした山口県下の橋梁（7橋9スパン）に対して目視点検およびアンケート調査を実施した。専門技術者の判断は、実際の橋梁の状態とよく一致していた。
- ② 専門技術者に対して行ったアンケート調査の結果を用いて、劣化診断機能の学習を行い、実際に目視点検で得られたデータを入力して、出力された診断結果と専門技術者による診断結果との比較を行った。その結果、概ね専門技術者の診断結果とESの診断結果は一致しているものの、ニューラルネットワークの学習に用いる橋梁データにより信頼性が左右され、学習範囲外の診断では、診断精度が劣っていた。
- ③ 劣化予測機能における劣化予測手法を検証するため、専門技術者に対して行ったアンケート調査における診断結果および劣化診断機能からの出力結果を用いて各橋梁に対する余寿命を予測し、専門家が回答した余寿命との比較をおこなった。本システムからの出力による余寿命は、専門家のもより、余寿命を短めに推定する傾向がみられた。
- ④ 維持管理計画最適化機能により、費用を最小化した場合と設定した費用内で橋梁の品質を最大化する場合の2種類の維持管理計画を策定した。概ね専門家の判断と近い結果が得られたが、専門家は、施工条件等も念頭に入れて判断を行っているが、本システムでは、施工条件等は考慮していないため、若干異なった結果を示す場合もみられた。

参考文献

- 1) 河村圭：Bridge Management System(BMS)の開発と橋梁の最適維持管理計画，山口大学大学院修士論文，1997.2.
- 2) 平成10年度建設省関係予算概算要求：建設省広報雑誌，第50巻，第9号，pp.28-41，1997.
- 3) 例えば，Bojidar S. Yanev: Bridge Management for New York City, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, pp.211-215, 1998.8.
- 4) 宮本文穂，串田守可，森川英典，木村和哉：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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 今崎直樹・山口亨：ファジィニューラルネットに向けて，Computer Today, No35, pp52-58, 1990.1.
- 8) 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.
- 9) 伊藤政夫，今野浩：数理計画の応用<理論編>，産業図書，1982.

(1998.11.14 受理)

PRACTICAL APPLICATION OF BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM(BMS)

Ayaho MIYAMOTO, Hideaki NAKAMURA, Ken-ichi YAMAOKA
and Kei KAWAMURA

Recently, the necessity of developing a practical bridge management system has been pointed out, because the maintenance of existing bridge has become a major social concern. The aim of this study is to develop a practical bridge management system(BMS) for deteriorated existing concrete bridges. This proposed system with multi-layered neural networks is able to show the results of prediction of deterioration processes in existing bridges with an optimal maintenance planning of the repair and/or strengthening measures based on life cycle cost minimization approach and also the results of the maintenance cost estimation. From the comparison of the results based on applying this system to some actual in-service bridges with the results of questionnaire surveys to domain experts, it is found that the optimal maintenance planning as well as the bridge rating can be predicted accurately using this system.