

Bridge Management System(BMS)の開発

宮本文穂¹・串田守可²・足立幸郎³・松本正人⁴

¹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 宇部市常盤台2557)

²正会員 工修 山口大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒755 宇部市常盤台2557)
((株)栗本鐵工所 橋梁設計部)

³正会員 工修 阪神高速道路公団工務部 保全施設部 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

⁴学生員 工学士 神戸大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

本研究は、従来より著者らが開発してきた「コンクリート橋診断エキスパートシステム」の出力結果を利用して、対象橋梁の床版および主桁それぞれの将来の劣化予測、最適な補修・補強工法とその費用の算定、さらには道路網の総合的なマネージメントが実行可能な「橋梁維持管理システム(Bridge Management System;BMS)」の開発を行ったものである。

Key Words : BMS(Bridge Management System), bridge maintenance, lifecycle cost, prediction of deterioration, load carrying capability, durability, repair, strengthening

1. 緒言

昭和30年頃から本格的に始まった全国的な道路交通網の整備事業の実施により、多くの道路橋が建設されてきたが、これらの橋梁の中には近年における交通量の急激な増加および車両の大型化に伴い、当初の設計よりも過酷な供用条件のもとで長期間の使用に耐え、著しい損傷を受けているものも多く、維持管理対策を早急に施すべき状態にある橋梁の数が年々増大している¹⁾。しかしながら、これらの橋梁の維持管理に使える予算には上限があるため、これまでのように定期的な点検の結果、必要とされる維持管理対策を順次すべて行っていくと、近い将来、老朽化した橋梁の補修・補強費が新設橋梁の建設費を圧迫する状況に陥ることが考えられる。これまで、橋梁の竣工後の維持管理対策は、「事後保全」が主流であった。すなわち、予測し得ずに起こった不都合な状況に対する処置として考えられていた。しかし、多くの先進国では1990年代に入り、道路建設事業に占める経費の比率が新設橋梁の建設費よりメンテナンスに多くを費やすようにならってきた。これによって、竣工後の維持管理費用の増大を抑制することも考慮にいった、いわゆる「耐久性設計」が各国でにわかに注目を集めるようになった²⁾。日本における高速道路網の整備は、アメリカなど他の先進諸国に比べて比較的最近のことで、維持管理に関する財政は現在のところそれほど切迫した状況にあるわけではない。しかし、今から約15年後の2010年頃に

は橋齢50年に達する老朽橋梁の割合が約35%に達するといわれており、限られた予算を有効に利用し、最適な維持管理計画を作成するための包括的なマネージメントシステムの必要性がクローズアップされてきている。

このような背景のもと、従来より著者らは、対象橋梁に関する目視点検程度の情報を入力することによってコンクリート橋の損傷程度を把握することのできる「コンクリート橋耐用性診断エキスパートシステム²⁾(以下エキスパートシステムと略記する)」の開発に取り組んできたが、本研究では、これをさらに発展させ、エキスパートシステムの出力結果を利用して対象橋梁の将来の劣化予測、最適な補修・補強工法とその費用の算定、さらには道路網の総合的なマネージメントまでが実行可能な橋梁維持管理システム;「Bridge Management System(BMS)」の開発を行うことにした。BMSの最終的な目標は、道路網をネットワークとしてとらえ、それらを総合的に維持管理するためにデータベースを利用し、例えば、ある橋梁が老朽化し通行不能になった場合に、迂回できる代替路があるか、そのときの通行料の減収や代替路の渋滞などによる期待損失はいくらかといったような、便益と損失を考慮した最適な維持管理対策を決定することであるが、本研究で開発するBMS(以下、本BMSと略記する)ではまずその第一歩として、ある一橋の対象橋梁に注目し、安全性・経済性・機能性を考慮した最適な維持管理対策を検討することにした。

2. BMSの現状

(1) 各機関におけるBMSの現状³⁾

a) BMSの概要

各橋梁管理機関で開発されているBMSの細部については様々であるが、BMSの基本的要素および最終ゴールはほぼ共通のものである。いずれにせよ、効果的なBMSを構築するためには、高速道路および橋梁管理機関、行政および研究開発機関などの幅広い支援が必要になる。その理由としては、BMSには膨大な量の橋梁の管理データや点検データが必要であるため必然的に大規模なプロジェクトに発展すること、また利用できる予算の上限などの情報は橋梁管理機関でしか実際には把握できないことが挙げられる。さらに、BMSを効果的に運用するには、以下に挙げる条件を満たす必要がある。

- ①完全かつアクセスが容易な最新のデータベース、
- ②予算の見積りおよび資金の割当公式、
- ③定期点検計画、
- ④検査者の訓練と教育、
- ⑤点検作業に必要な器具の準備、
- ⑥設定した作業目的(品質)に対する性能評価、
- ⑦橋梁の状態および機能に関する迅速な情報、
- ⑧すべての橋梁情報に対する外部からのアクセスの保証。

これらの中には各橋梁それぞれに対しての最適維持管理計画の策定を目的としたプロジェクトレベル(1橋レベル)でのBMSと、道路網全体での最適維持管理計画の策定を目的としたネットワークレベルでのBMSの両方に必要な事柄もあれば、ネットワークレベルになってはじめて必要になる事柄もある。また、BMSの解析ツールには以下の能力が備わっている必要がある。

- ①橋梁部材の損傷状態の正確な予測、
- ②任意の類似する多くの広範囲な政策、対策の評価、
- ③予算を考慮した最適プロジェクトの選定、
- ④短期および長期の両方における、橋梁に必要な維持管理の推測。

b) Life Cycle Cost Model

多くの投資決定モデルと同じく、Life Cycle Cost Modelも将来的な投資効果を考慮したものであり、その効果は利用者与管理者に還元されるものである。通常、Life Cycle Cost Modelは、維持管理を行う時期と順序を規定した予定表から計算され、その予定表の立案は橋梁の履歴や損傷の進行度より決められている。すべての選択肢に対してこのような費用比較が行われ、トータルとして最小のものが経済的に最良とされる。ここで注意すべき点は、単純なLife Cycle Costによる費

用の比較は単に各選択肢に要する費用を比較しているのであって、経済性を最適化することにはならないということである。経済性の最適化は、便益計算を組み合わせた最適化モデル(2.(1)c)参照)によってはじめて実現される。また、貨幣価値の上昇を考慮した割引率(Discount Rate)についてはあくまで維持管理費用を投資として考えた場合に考慮すべき項目であるため、公共構造物のように補修・補強に費用を投じることが投資という概念に当てはまらないものについては当面のところ考慮する必要がないと考えられる。

c) 最適化モデル

最適化モデルは、各維持管理の内容に対して限られた予算内で最大の便益を得られるものを選択するためのものであり、要した費用と得られる便益とが組み合わせて考えられなければならない。このときの費用と便益は管理者と利用者が分担する場合が多く、問題を複雑にしている。これをさらに発展させたモデルとして複数年における道路網の最適化を行うことのできる多年モデルがある。このモデルは、橋梁の状態、交通量の推移および予算を、20年といったような長期計画で検討することによって、例えば今後5年間で20%の予算の削減があった場合の橋梁の性能、機能に対する影響や、その結果サービス水準を落とした場合の利用者に与える影響なども検討することを可能にし、BMSにおける最も大きな成果の1つともいえる。

(2) 現在稼働中のBMS

a) PONTIS -アメリカにおけるBMS^{4),5)}

現在、アメリカには約611万kmの道路網と約56万橋もの橋梁が存在するが、これらの内約70%が1935年以前に建設されたものである。それ故、何らかの維持管理対策を必要としている橋梁の数が全体の約40%にも達しており、これらの橋梁を維持管理するための財源として4R財源(Restoration, Rehabilitation, Resurfacing, Reconstruction)と特別橋梁復旧財源を用意し努力している。しかしながら、有効な費用効果をもたらす適切な資金配分という面では問題を抱えており、橋梁網をネットワークとしてとらえ、ネットワーク全体の利益、予算、制約条件を考慮して各々の橋梁を評価することのできるシステムの必要性がますます重要視されている。このような背景のもと、1991年12月に、維持、補修、修繕(以下、MR & Rと略記する)工事などにおける予算の有効活用を目指したPONTIS(ver.1)が、また、1993年11月にはPONTIS(ver.2)が開発された。PONTISでは、従来アメリカ各州で用いられてきたデータベースNBI(National Bridge Inventory)がそのまま生かされているため、どの州においてもすぐに導

入することが可能である。PONTISの特徴としては、以下の項目が挙げられる。

- ①MR & RとImprovement（改良工事）の明確な区別、
- ②データベースの更新、
- ③橋梁の情報に関する専門家の判断の導入、
- ④将来の交通量の予測、
- ⑤損傷度の評価。

上記⑤においてPONTISでは、橋梁各部の損傷度をいくつかの損傷ランクに分類することによって離散的に表現している。そして各損傷ランクは、年数を経るごとに損傷度の大きいランクに徐々に移行していくが、その移行する速度を、2年間で状態*i*から状態*j*に移行する確率 P_{ij} （遷移確率）を用いて表している。この P_{ij} は、データが追加されるごとに逐次更新される。

b) その他の諸外国のBMS

上記のアメリカ以外の諸外国でも、オーストリア、ポーランド、デンマークなどで、それぞれ“BRIDGES”⁶⁾、“SGM”⁷⁾、“Danbro”³⁾などと呼ばれるBMSが開発されている。

c) 阪神高速道路公団で開発中のBMS⁸⁾

現在、阪神高速道路公団では、RC床版を対象としたBMSのプロトタイプを作成中である。主な特徴としては、定期的な点検によって得られた床版の損傷度をいくつかのランクに分類し、得られた損傷ランクがある単位時間の経過の間にそれより悪い状態に移移する確率を遷移確率マトリックスを用いて表している点が挙げられる。例えば、単年度の遷移確率マトリックスを P とおき、現状の損傷ランクの状態ベクトルを S_0 とおくと、 n 年後の状態ベクトル S_n は、次式で表される。

$$S_n = P^n \cdot S_0 \quad (1)$$

この遷移確率マトリックスを、蓄積した点検データをもとに逐次更新することによって橋梁部材の劣化の予測を合理的に行えるようになってきている。そして各損傷ランクごとに必要な補修費用や利用者コストの増加分などを計算しこれらをもとにして必要な費用を求めて最適補修時期の選定に役立っている。

3. BMSの開発環境

(1) BMS関連用語の定義⁹⁾

本BMSで用いる主要な関連用語を、表-1のように定義する。また、各種耐用年数に関するイメージを比較したものを図-1に示す。

(2) 本BMSの特徴

BMSに必要な項目のうち最も重要なものとして、各橋梁部材ごとの損傷度の現状把握と今後の劣化予測の手

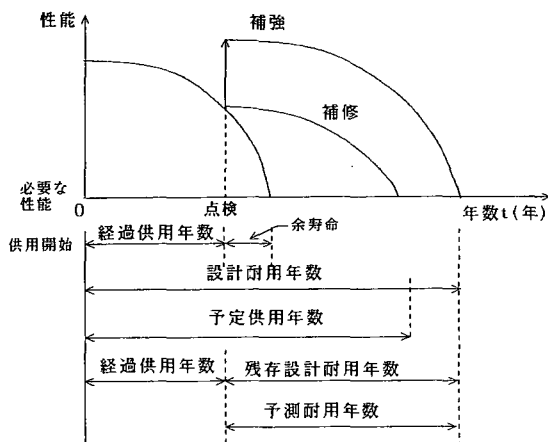


図-1 耐用年数および供用年数などのイメージ図

法が挙げられる。これらを行う手法としては、大きく分けて次の二つが考えられる。まず一つは、定期点検などによって得られる大量の経時データを保存したデータベースをもとに、各損傷レベルごとに損傷ランクが時間とともに悪くなる確率（状態遷移確率）⁸⁾を求めて、これに点検によって得られた現在の損傷度を照らし合わせて将来の劣化予測を行う方法で、劣化の予測に専門的な知識を必要とせず、一度に大量の客観的なデータを扱えるという利点があるが、すべてをこの方法に頼ると、幾度にも渡ってデータベースを更新していくうちに実際の劣化の様子と食い違ってくる危険性がある。もう一つの方法は、橋梁部材の損傷度の把握から劣化の予測までを専門家の知識と経験に委ねる方法で、劣化予測と実際の劣化が大きく食い違うことはないが、橋梁診断を行えるエキスパートの人数が劣化予測が必要な橋梁数に比べて極端に不足していることが大きな問題となってくる。そこで、本研究では橋梁診断を行う手法として、独自に開発中のエキスパートシステム²⁾の利用を考える。このシステムでは、橋梁部材の損傷度を把握するのに専門家の有する主観的な曖昧さを含む経験的知識を取り入れることができ、しかもシステムへの入力項目は簡単な目視点検程度の情報でよいから、専門家の不足という問題点に遭遇することもない。このエキスパートシステムの利用は、本研究におけるBMS独自のものであり、他の機関のものとは違う特徴となっている。

(3) エキスパートシステムとの関連

a) 本BMSにおけるエキスパートシステムの位置付け

本BMS中での、エキスパートシステムの利用方法を示したフローを図-2に示す。まず、新設橋梁か既設橋梁

表-1 BMS関連用語の定義

橋梁マネージメントシステム (BMS)	高速道路および橋梁管理機関が、ある1橋の対象橋梁に対して最適な管理手法の選択を行うための支援システム。
橋梁の維持管理 (Bridge Maintenance)	橋梁のライフタイムを通じてその性能および機能のある水準以上に保持させることに関連したすべての行為。例えば、点検、調査、劣化予測、診断、補修・補強、拡張など。
ライフタイム (Life Time)	橋梁の計画、設計段階あるいは架設時から架け替えるまでの期間で、ライフタイムコストニングの対象となる年数。
ライフサイクルコスト (Lifecycle Cost)	橋梁のインシヤルコストおよび設定された設計耐用年数の間に、橋梁に期待される性能を保持するのに要するすべての費用の総計。例えば、安全性、経済性、機能性などを総合して評価される。
劣化予測 (Predection of Deterioration)	橋梁の新設、点検あるいは補修・補強の時点で劣化を予測すること。
診断 (Rating or Diagnosis)	種々の点検結果をもとに、各点検結果に対する特性値を求め、橋梁全体あるいは橋梁部材の損傷劣化要因に関する健全度を評価・判定する行為。
耐荷性 (Load Carrying Capability)	橋梁部材の耐荷力に基づいて評価される橋梁の性能。例えば、0~100の数値で表される。
耐久性 (Durability)	橋梁部材の劣化速度からみた、現時点における橋梁部材の劣化に対する抵抗性。例えば、0~100の数値で表される。
補修 (Repair)	耐久性の劣化した橋梁部材の性能低下の経時変化曲線の勾配を緩和させるための維持管理対策。例えば、材料の中性化の防止、橋梁部材の塗装、ひび割れに対する樹脂注入など。
補強 (Strengthening)	耐荷性が劣化した橋梁部材の性能を増すための維持管理対策。例えば、外ケーブルによるプレストレスの導入、縦桁増設など。(示方書などの改訂による耐荷性向上も含む)
余寿命 (Remaining Life)	点検結果に基づく診断によって予測される、必要な性能および機能を満足しなくなる状態(限界状態)に達するまでの残りの寿命。

かによって分岐を行う。新設橋梁の場合は建設費を標準的なものに比べて多くかけるときに、その使い方によって橋梁部材の劣化曲線に対する影響を予測し(①②)、ライフサイクルコストを最小化するようにBMS解析を行う(⑦)。次に既存橋梁の場合は、まず簡便な目視点検程度の点検と一部詳細点検に分類される点検を組合わせた約50項目の点検を行い¹⁵⁾(③)、その結果をエキスパートシステムに入力し、橋梁部材の点検時における健全度(損傷度)を評価する(④)。そしてその点検結果をもとにして、劣化予測式より劣化の現在までの進行経路とこれからの余寿命を予測する(⑤)。また資料より補修・補強工法とその効果、費用の関係をあらかじめ求めておき(⑥)、劣化予想曲線への影響を考慮してBMS解析(⑦)を行う。BMS解析の出力項目は、最適補修・補強時期、工法、必要な費用の総計(ライフサイクルコスト)である。また、最終的には予算の制限という制約条件が加わった場合にも、それに従って最適補修・補強計画が出力できるようにしなければならない。

b) 橋梁部材の劣化予測手法

エキスパートシステムによって、橋梁部材の現在の損傷度は把握できるが、将来の劣化の進行程度は予測できない。そこで、橋梁部材ごとの健全度を表す指標として「耐荷性」、「耐久性」の2つを考え、それぞれについて劣化の進行経路を曲線で表現した「予想劣化曲線」を考えることにより、劣化予測を行うことにし

た。予想劣化曲線の作成に際して、以下に示す仮定を設けた。

①エキスパートシステムの出力である耐荷性、耐久性の平均健全度をそれぞれ S_L 、 S_D とおく。橋梁部材の劣化は、一般に橋齢が古くなるに従って急速に進行すると考えられているため、橋齢を横軸に、耐荷性、耐久性の平均健全度を縦軸にとってグラフを描くと、上に凸な形状のグラフになることが予想される。そこで、それぞれについての劣化曲線式を、耐荷性については式(2)に示す年数 t についての四次関数、一方、耐久性については、耐荷性の経時変化を表す曲線の微係数で表されると考えて、式(3)に示す年数 t についての三次関数で表すことにした。

$$S_L = f(t) = b_L - a_L t^4 \quad (2)$$

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

ここで、 a_L 、 a_D 、 b_L 、 b_D は定数。

すなわち、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^{10)・11)} などから、おおよそ四次関数に近い形でカーブを描くことが予想されることから、耐荷性の劣化曲線式を四次関数と仮定し、一方、耐久性については、耐荷力などの橋梁の性能、機能などの経時変化に対する抵抗性と定義されていることから⁹⁾、耐荷性よりも次数が1つ少ない(微係数)と

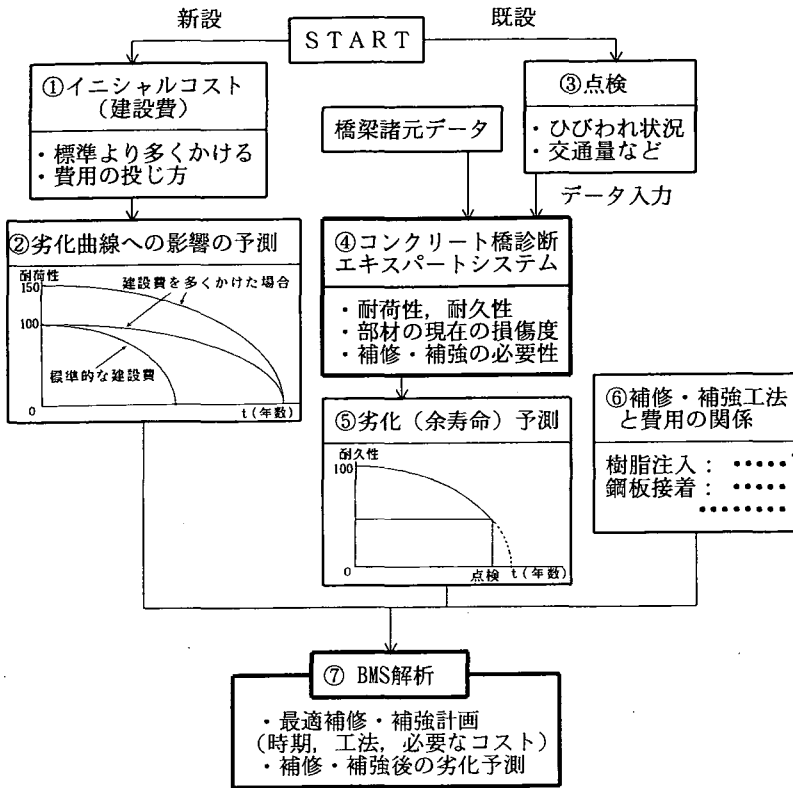


図-2 BMSにおける「橋梁診断エキスパートシステム」の位置付け

いう考えが一般的かつ合理的であると考えられるため、耐久性の劣化曲線式を三次関数と仮定した。

②耐荷性、耐久性の平均健全度は、0~100の数値で表され、供用開始時の値を100とし、経年劣化によって最終的に0になった時に使用限界に達したとみなし、架け替えが必要であるとする。

③補修・補強を行うことによって橋梁部材の耐荷性、耐久性に何らかの影響を与えるものとし、新たに劣化・余寿命予測を行うこととする。このとき、供用開始から補修・補強を行うまでの劣化曲線の式を、耐荷性； $S_L = f_o(t) = b_{L0} - a_{L0}t^4$ 、耐久性； $S_D = g_o(t) = b_{D0} - a_{D0}t^3$ とおき、 i 回目の補修・補強後の劣化曲線式を $S_{Li} = f_i(t) = b_{Li} - a_{Li}t^4$ 、 $S_{Di} = g_i(t) = b_{Di} - a_{Di}t^3$ とおく。

④1回目の点検時までの予想劣化曲線式は、橋齢0年(供用開始時)のときの平均健全度が100であることと、点検時の平均健全度のデータの2つを利用して求める。

以下に劣化曲線式を用いた余寿命予測の例を示す。

(例1) 橋齢60年で、耐荷性の平均健全度が50、耐久性の平均健全度も50にまで劣化した床版について余寿命予測

・耐荷性 S_L について

$f_o(t) = b_{L0} - a_{L0}t^4$ において、 $(t, f_o) = (0, 100), (60, 50)$ の2点を代入して、定数 a_{L0}, b_{L0} をそれぞれ求めると、 $a_{L0} = 50/60^4$ 、 $b_{L0} = 100$ となり次式が得られる。

$$f_o = 100 - (50/60^4)t^4 \quad (4)$$

このまま補修・補強を行わずにいた場合の、この床版の耐荷性からみた余寿命を $t_{L0r.o.}$ とおくと、式(4)において $f_o = 0$ とおくことにより、

$$t_{L0r.o.} = \sqrt[4]{b_{L0}/a_{L0} - 60} = 11.3 \text{ (年)}.$$

・耐久性 S_D について

$g_o(t) = b_{D0} - a_{D0}t^3$ において、耐荷性の場合と同様にして定数 a_{D0}, b_{D0} をそれぞれ求めると、 $a_{D0} = 50/60^3$ 、 $b_{D0} = 100$ となり次式が得られる。

$$g_o = 100 - (50/60^3)t^3 \quad (5)$$

このまま補修・補強を行わずにいた場合の、この床版の耐久性からみた余寿命を $t_{D0r.o.}$ とおくと、式(5)において $g_o = 0$ とおくことにより、

$$t_{D0r.o.} = \sqrt[3]{b_{D0}/a_{D0} - 60} = 15.6 \text{ (年)}.$$

表-2 補修・補強工法の特徴

工法	分類	特徴
樹脂注入 床版・主桁	補修	・鉄筋の防錆効果および床版の防水性が期待できる ・応荷力の増加は期待できない
断面修復 床版・主桁	補修	・コンクリートの欠落および材料劣化に対して有効 ・耐荷力の増加は期待できない
縦桁増設 床版	補強	・床版の活荷重負担が縦桁増設により減少する ・補強後も床版裏面が見えるので点検が容易
床版増厚 床版	補強	・床版厚が大きくなり抵抗断面の増大効果が大きい ・主桁などに対する死荷重応力が大きくなる ・交通処理が必要である
鋼板接着 床版・主桁	補強	・床版の耐荷力の増加が期待できる ・補強後の損傷状態の確認が困難である
FRP接着 床版・主桁	補強	・床版の耐荷力の増加が期待できる ・施工が容易で工期が短い ・壁量で死荷重の増加がない ・接着枚数によって効果を調整できる ・補強後の損傷状態の確認が困難である
床版打替え 床版	補修 補強	・床版の復旧効果が最も確実である ・交通規制期間が長期におよぶ
ガラスクロス 主桁	補修	・施工が容易である ・鉄筋の防錆および主桁の防水性が期待できる
モルタル吹付け 主桁	補修	・豆板など、ひび割れ以外の損傷の補修に適する ・既存部分との付着に不安がある
外ケーブル 主桁	補強	・耐荷力の大幅な向上が期待できる ・施工が大がかりになり、費用も高価になる

(4) 補修・補強について

補修・補強については、3. (1)「BMS関連用語の定義」によると、「補修」は主に耐久性の劣化に対する処置であり、「補強」は主に耐荷性の劣化に対する処置であるとしているが、耐荷性、耐久性の両方に有効な補修・補強工法もあり、各工法ごとにその効果も異なる。また、補修を行うということは、耐久性をグレードアップさせるのみならず、耐荷性の劣化のスピードを緩やかにする働きもあり、これらの効果がどの程度であるのかを調べる必要がある。これらについては、「4. BMSの構築」で詳述することにする。

4. BMSの構築

(1) BMS構築の手順

a) 補修・補強工法の整理

BMSの構築に際して、まず床版、主桁に対する各補修・補強工法についてその特徴を整理し、表-2に示す¹⁰⁾。

これらの工法のうち、樹脂注入工法、鋼板接着工法、縦桁増設工法は施工例が多く、現在比較的一般化された工法である。これまで、補修・補強工法の選定方法は各管理機関によって様々であり、統一された明確な基準が設けられているわけではなかった。今後は、一

表-3 床版の補強工法の選定基準の例¹³⁾

工法	採用する基準
縦桁増設	床版、床組などの変形剛性が不足する場合に採用する
床版増厚	床版厚が不足する場合に採用する
鋼板(FRP)接着	配力筋の不足を補う場合に採用する
床版打替え	床版が抜け落ちる状態に近い場合に採用する

般化された工法から新しい工法までをすべて選択肢の中に取り入れ、期待した補修・補強効果が得られるように最適な工法を選べるようにすべきである。補修・補強工法を選定する基準は、各管理機関によって独自のものがあるが、本BMSでは建設省の基準を参考に工法選定を提案する。例として、床版に対する4種類の補強工法(縦桁増設、床版増厚、鋼板(FRP)接着、床版打替え)の選定の考え方を表-3に示す。

b) 補修・補強工法の選定

以上のような考え方にに基づき、補修・補強工法の選定方法を具体的に検討した。エキスパートシステムによる橋梁診断の出力結果を利用し、床版、主桁のそれぞれについて、補修・補強工法を選定するフロー図を図-3および図-4に示す。

基本的には、損傷程度が悪くなるに従って図中の下の方に進んでいく。各補強工法には、補修工法を組み合わせる工法選定を行うことができるが、補強工法同士の間組み合わせは原則として行えないものとする。

実際に工法を採用する段階になると、単に損傷の状態だけでなく交通条件や構造条件、施工条件など、多様な観点から判断する必要があるため、与えられた条件だけでは工法選定を一律に基準化することはできない。そこで、例えば図-3に従って最終的に床版に対する補強工法として「鋼板(FRP)接着、床版増厚、縦桁増設」の3つが推薦された場合には、それぞれの工法の特徴とその工法を採用した際の予想される余寿命を示し、ユーザが最終的な工法の選定を行えるようにした。

c) 補修・補強効果

補修・補強を行った場合に、耐荷性、耐久性の劣化曲線にそれぞれどのように影響を与えるかについては、全く新しい分野であるためこれまでの概念では判断できない領域になる。そこで、実際に橋梁を維持管理する管理機関に所属する技術者の意見を参考にし、補修・補強がどの程度耐荷性、耐久性を回復させるかについて考察した。

まず、補修・補強の基本的な概念は、補強を行うと耐荷性の平均健全度がグレードアップし、補修を行うと耐久性の平均健全度がグレードアップすると考える

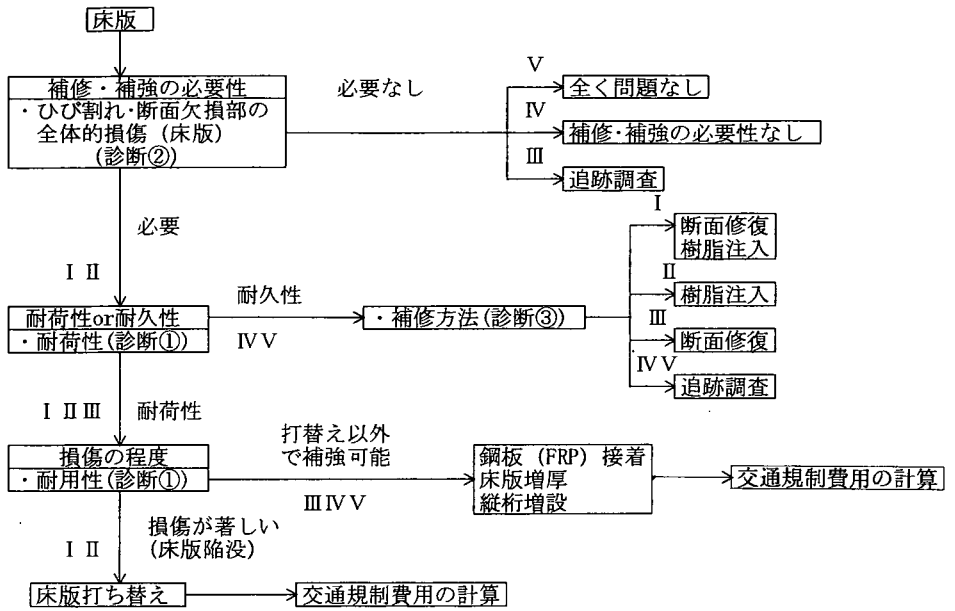


図-3 床版の補修・補強工法の選定フロー (図中のアラビア数字は表-9参照)

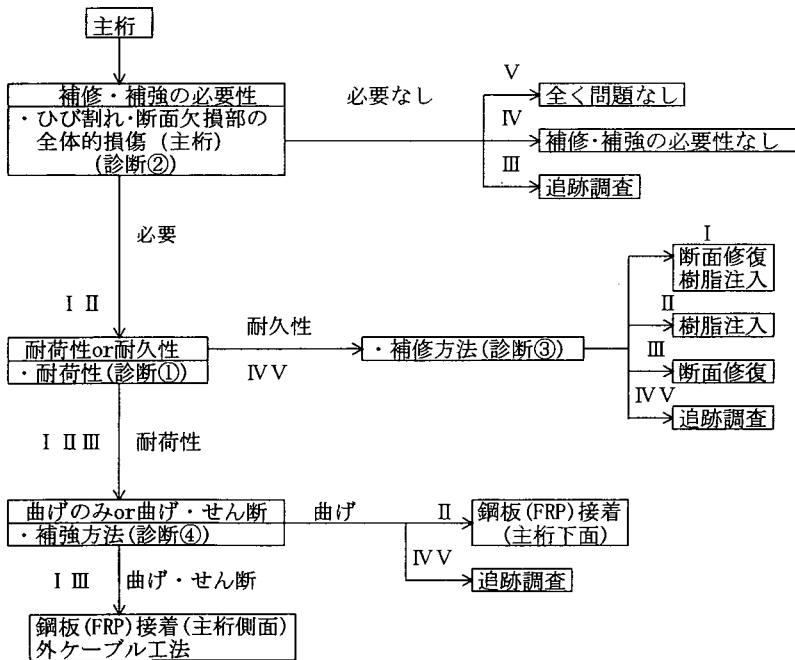


図-4 主桁の補修・補強工法の選定フロー (図中のアラビア数字は表-9参照)

が、補修の効果として新たに「耐荷性の平均健全度の劣化速度の緩和」という概念を導入してより現実に近いモデルにした。

次に、補修・補強を行うと、各工法ごとに耐荷性、耐久性の平均健全度がいくら回復するかをさらに具体

的に検討した。

まず、はじめに補修についてであるが、床版、主桁のどちらにしても「樹脂注入工法」、「断面修復工法」の二つを基本的な工法と考え、これらの効果を同じであると仮定した。これら二つの工法の内、樹脂注入工

表-4 衝撃係数0.3, 床版支間3.08mの場合の M_{i+1} , t

設計年次	M_{i+1}	床版厚 t	主桁間隔
～1968年	2.49 (t・m)	桁間隔Aで $t=18\text{cm}$ Bで $t=17\text{cm}$	A=3.85m B=3.08m
～1971年	同上	$t=18.24\text{cm}$	同上
～1978年	3.38 (t・m)	$t=20.24\text{cm}$	3.6m以下
～1993年	同上	$t=25.3\text{cm}$	3.0m以下
1993年～	3.52 (t・m)	同上	同上

法はひび割れに対して、断面修復工法はコンクリート断面の欠損・材料の劣化に対して行うとした。これら二つの工法の効果を基準にして、他の工法の効果を実際の橋梁の維持管理を行う技術者の意見を参考にして適切な係数を乗じることにより仮定した。基準となる2工法の効果についてであるが、補修を行う際の回復目標値をいくりに設定するかによってその効果を仮定すべきであるが、補修を行う以上、耐久性については新設時と同じ状態（耐久性の平均健全度100）にまで回復させることを目標とするのが普通であるため、これらの工法による耐久性の平均健全度の回復度は100とする。すなわち、「補修を行った瞬間に耐久性の劣化曲線は、不連続に100にまで回復する」と仮定した。また、補修を行った後も耐久性の劣化曲線の傾きは変化しないと仮定した。一方、耐荷性については、「劣化速度の緩和」という概念をモデルに表現するために、「補修を行った瞬間に耐荷性の劣化曲線の傾きがいくらか回復する」という考え方を導入した。この傾きの回復の度合いをいくりに設定するかについては、現状では不確定な部分が多いが、専門家を交えて種々検討した結果、ここでは「傾き（劣化曲線式の微係数）が(1/2)倍に回復する」とも仮定した。

次に補強についてであるが、まず補強を行わなければならない状態に陥った原因を考えることによって補強の効果を仮定する足がかりにすることを考えた。補強工法として分類されている工法は、何らかの形でその部材の耐荷機構を変化させ、耐荷力の増強を目指すという目的で行われるものであるため、補修の場合と同じ考えに基づいて「耐荷性の平均健全度を100まで回復させるが、その後の曲線の傾きは変化しない」というモデルでは、上述の補強の効果をうまく表現できているとは言い難い。また、補強というものが、古い設計基準に基づいて設計されたものの「レトロフィット」、すなわち、補強を行うことにより、時代と共に徐々に増加してきた交通荷重に対しても十分に抵抗できるように耐荷機構そのものを改善するという概念に基づいているため、供用開始時点での耐荷性の平均健全度を100としたならば、補強後の耐荷性の平均健全度

は、古い設計基準に基づいて設計されたものについては少なくとも100以上に回復させることができるはずであるため、上述のモデルは合理性に欠けることになる。このような考え方のもと、実際に設計基準の変遷を考慮して耐荷性の回復度をいくりに設定すればよいかを検討した。

＜床版について＞

床版に対する補強工法をその耐荷機構の変化のさせ方によって分類すると、①鋼板（FRP）接着、②床版増厚、③縦桁増設、④床版打替えの4種類に分けられる。それぞれについて、耐荷性の回復度を考察した。

表-4に、道路橋示方書に基づく設計年次別設計基準式の支間中央での設計曲げモーメント M_{i+1} (t・m)、床版厚 t (cm)のそれぞれの設計基準式に、代表的な値として衝撃係数 $i=0.3$ 、床版支間 $L=3.08$ (平均値)を代入したときの M_{i+1} の値と、床版厚 t の値を実際に計算した値、ならびに主桁間隔の基準を示し¹⁾、上述①～④のそれぞれの工法との関連について考察する。

① 鋼板（FRP）接着工法

鋼板（FRP）接着の原理は、配力筋の不足を補うために、接着した鋼板またはFRP (Fiber Reinforced Plastic) を引張鉄筋のごとく作用させて床版の曲げ耐力を補強するものであるため、床版の設計曲げモーメントの変遷を考慮に入れて計算を行った。1993年以降は現在の設計基準で設計されているため、これに補強を行った場合の耐荷性回復度（ここでは、これを b_{L10} とおく）を $b_{L10}=100$ とする。これを基準として、各設計年代ごとに b_{L10} を求めることによって鋼板（FRP）接着の効果を明確にしていく。この場合の計算の仕方は、例えば、1968年以前に設計された床版では、もともと $M_{i+1}=2.49$ (t・m) で設計している床版を補強によって $M_{i+1}=3.52$ (t・m) で設計したものと同一レベルにまで引き上げられる（グレードアップ）と考えれば、1968年以前に設計された床版の鋼板接着による b_{L10} は、1993年以降に設計されたその100に対して、 $b_{L10}=100 \times (3.52/2.49)=142$ となる。他の年代のものについても同様に計算する。また、FRP接着については、次のような仮定を設けて、鋼板接着に準じて計算を行うことにした。

- ・FRPは、橋軸方向および橋軸直角方向に2枚を一組として接着するものとし、最大4枚まで接着できるものとする。
- ・4枚接着した場合の効果および費用を鋼板接着と同じであるとし、2枚接着する場合には、費用は安価であるが、耐荷性回復度は4枚の場合に比べて頭打ちするものとし、適当な係数を乗じることにより求められる。

さらに、鋼板（FRP）接着工法を用いた場合は、床版

表-5 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度 b_{L10} (床版)

設計年次	鋼板接着 (FRP4枚)	FRP2枚接着	床版増厚	床版打替え
～1968年	140	120	150	150
～1971年	140	120	150	150
～1978年	110	110	130	130
～1993年	110	110	100	110
1993年～	100	100	100	100

表-6 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度 b_{L10} (主桁)

設計年次	鋼板接着 (FRP4枚)	FRP接着 (2枚)	外ケーブル
～1939年	130	120	150
～1956年	120	110	140
1956年～	100	100	100

下面を鋼板またはFRPで覆うため、床版上面からの水の浸透が無いと仮定すれば、床版下面での防水性、ならびに鉄筋の防錆効果が期待できるため、純粋な補修工法ほどではないが、耐久性の劣化曲線にも影響を及ぼすと考えられる。そこで、鋼板 (FRP) 接着の耐久性の劣化曲線への影響の具体的値として、専門家の意見などを参考にして「耐久性が70まで回復する」と仮定した。

② 床版増厚工法

床版増厚 (上面) は、床版厚の不足のため剛性の不足する床版に対して圧縮側 (床版上面) にコンクリートを打設することによって剛性自体を高める工法であるため、床版厚の設計基準の変遷をもとに耐荷性回復度 b_{L10} の計算を行う。床版増厚による曲げ耐力の増加を、圧縮側コンクリートの等価応力ブロック法によってモデル化することにより算出した。等価応力ブロック法によると、設計終局曲げ耐力 M_{ud} は、次式で表される。

$$M_{ud} = \frac{A_s f_{yd} z}{\gamma_b} \quad (6)$$

ただし、 A_s : 鉄筋の断面積、

f_{yd} : 鉄筋の設計降伏強度、

z : 圧縮合力作用点から鉄筋重心位置までのアーム長、

γ_b : 部分安全係数

ここで、床版厚だけの影響を考慮するため鉄筋断面積 A_s を一定と仮定して、 M_{ud} を各設計年次について計算した。なお、耐久性については床版増厚を行っても効果がないものとした。

③ 縦桁増設工法

縦桁増設は、床版支間を短くすることによって床版に作用する曲げモーメントを減じる工法である。従って、耐荷性については、主桁間隔によってその効果が異なってくると思われる。既存橋梁の主桁間隔の平均値は約3.0mであり、設計年次にかかわらず各橋梁によって主桁間隔も様々であることが予想されるので、縦桁増設工法による耐荷性回復度は、設計年次にかかわらず次式を用いて求めた。

$$b_{L10} = \frac{(\text{主桁間隔(m)}) \times 100}{3.0} \quad (7)$$

(※T荷重載荷であるため桁間隔は曲げモーメントに比例倍で影響してくる)

なお、耐久性については、縦桁増設工法を行っても効果がないものとした。

④ 床版打替え工法

床版打替えは、床版全体、あるいは一部分を全く新しいものにする工法であり、床版の耐荷性、耐久性の両方に最も効果が期待できる工法である。そのため、耐荷性については、縦桁増設を除く他の補強工法 (鋼板 (FRP) 接着、床版増厚) の中で各設計年次において最も効果的な工法と同程度の効果が期待できるとした。また、耐久性についても、全く新しい床版になることから最大の100にまで回復するとした。

以上に示した床版についての、設計年次別の各補強工法による耐荷性回復度を計算し、十の位までに丸めたものを表-5にまとめて示す。

<主桁について>

主桁に対する補強工法を床版と同様に分類すると、①鋼板 (FRP) 接着、②外ケーブル工法に二種類に分けられる。それぞれについて床版と同様に耐荷性回復度を計算した。ただし、主桁については設計荷重の変遷が大きく関与すると考えられることから、ここでは示方書における1等橋の等分布荷重の変遷に注目して行った。

① 鋼板 (FRP) 接着工法

1等橋の等分布荷重の設計荷重を支間 $L = 80$ m のときを例にとりて計算し、各々の設計年次について床版の場合と同様にして耐荷性回復度 b_{L10} を計算した。また、FRP2枚接着の場合も、床版と同様にその効果を仮定した。

② 外ケーブル工法

外ケーブル工法は、その設計の概念から補強のメカニズムまでが、他の補強工法に比べて特殊であり、まだ解明されていない点も多くあるため、その効果を明確に計算することはできないので、現在のところ、鋼

表-7 補修・補強効果と費用 (床版)

工法	耐荷性	耐久性	費用
樹脂注入	※1	100まで回復	23.8U
断面修復	※1	100まで回復	14.0U
縦桁増設	※2	効果なし	44.3U
床版増厚	表-5参照	効果なし	43.0U
鋼板接着	表-5参照	70まで回復	75.0U
FRP接着	表-5参照	70まで回復	4枚75.0U 2枚52.0U
床版打替え	表-5参照	100まで回復	45.0U

※1) 傾きが半分に回復, ※2) 100×(主桁間隔/3.0)

表-8 補修・補強効果と費用 (主桁)

工法	耐荷性	耐久性	費用
樹脂注入	※1	100まで回復	23.8U
断面修復	※1	100まで回復	14.0U
ガラスクロス	※1	100まで回復	25.2U
モルタル吹付け	※2	80まで回復	14.0U
鋼板接着	表-6参照	70まで回復	112.5U
FRP接着	表-6参照	70まで回復	4枚112.5U 2枚 78.0U
外ケーブル	表-6参照	効果なし	150.0U

※1. 傾きが半分に回復, ※2. 傾きが5/8倍に回復
注) 耐荷性回復度については, 表-5, 6参照.
補修費には, 補修用足場費用4.2Uを含む.

板(FRP)接着よりもやや大きい値を耐荷性回復度に与えることにした.

以上に示した主桁についての, 設計年次別の各補強工法による耐荷性回復度を計算, 仮定し, 十の位までに丸めたものを表-6に示す. また, 各補修・補強工法別の耐荷性, 耐久性への影響と単位面積当たりの費用を整理し, まとめたものを次頁の表-7および表-8に示す. ここで, 費用の単位U(Unit)は1U=¥1,000/m²を目安として換算するものとする.

表-5に示した床版に関する設計基準の変遷に注目すると, 主桁に比べて比較的最近になって頻繁に基準が改正されていることがわかる. この原因として, 1968年以前の橋梁では, 死荷重軽減による経済性が重視され, 鉄筋およびコンクリートの許容応力度を大きくとり, 鉄筋量を増すことにより床版厚を極端に薄くする設計がしばしば行われていたため床版の剛性が不足しており, さらにこのときの床版は等方性版と考えられ版支間方向の曲げモーメントのみを考慮し, 支間直角方向については主鉄筋量の25%程度の配力鉄筋しか配置していなかったことから, 損傷事例が多くみられたことが考えられる¹⁾.

以上, 各補修・補強工法についての大まかな効果は仮定できたので, 以下に実際に劣化予測を行う際に耐

荷性の劣化予測式をどのように変化させるかを具体的に考えていく. ただし, 以下に示す劣化予測の例は, すべて1回目の補修・補強について考えているものとする. なお, 実際に補修・補強後の余寿命を計算した具体例を「例2」として示す.

補強

補強による耐荷力の余裕分を考慮すると, 補強による耐荷性の劣化曲線への影響として, 劣化曲線の縦軸方向へのグレードアップの他に劣化曲線の傾きの緩和という効果が期待できると考える. いま, この傾きの緩和の度合いを専門家の意見を参考にして適当な係数を用いることにより表現した. ここでは, この係数を(2/3)程度であると仮定するが, データが多く集まり実際の余寿命とうまく一致しないようであればこれを変更できるものとする. また, 耐荷性回復度 b_{L10} の意味合いを考えると, この処置によって新たに耐荷性の劣化曲線の傾きが $(100/b_{L10})$ 倍に緩和されることになる. また, 前述のように b_{L10} は現在の設計基準で設計したものの, 耐荷性回復度を100と考えた場合の値であることから, 補強後の耐荷性の劣化曲線式は次式で表される.

$$f_i = b_{L1} - a_{L1} t^4 \\ = b_{L10} - (2/3) \cdot (100/b_{L10}) \cdot a_{L1} t^4 \quad (8)$$

補修

補修による耐荷性の劣化曲線への影響は, 「曲線の傾きの緩和」であったが, その度合いについても, 専門家の方の意見を参考にして適当な係数を設けることによって仮定した. 当面のところ, この係数を(1/2)程度と仮定しておく.

(例2) (例1)に示した床版(橋齢60, 耐荷性50, 耐久性50)に対して, この年に1回目の補修・補強工法として, 次の①~③の工法を採用したときの新たな劣化曲線式の作成ならびに余寿命予測

例1より, このまま補修・補強を行わなかった場合, この床版の耐荷性からみた余寿命は $t_{L0.0} = 11.3$ 年, 耐久性からみた余寿命は $t_{D0.0} = 15.6$ 年である.

① 床版増厚工法による補強

・耐荷性 S_L について

橋齢60年であるので, 設計年次から考えて床版増厚工法による耐荷性回復度, $b_{L10} = 150$ である(表-5より). よって, 補強後の劣化曲線式は次式で表される.

$$f_i = 150 - (2/3) \cdot (100/150) \cdot a_{L0} t^4 \\ = 150 - (2/3) \cdot (100/150) \cdot (50/60^4) t^4 \quad (9)$$

ゆえに、この床版の補修後の耐荷性からみた余寿命 $t_{L1r.o}$ は、

$$t_{L1r.o} = \sqrt[4]{b_{L1}/a_{L1}} - 60 = 36.7 \text{ (年)}.$$

・耐久性 S_{L1} について

床版増厚工法は、耐久性には効果のない工法である。

② 樹脂注入工法による補修

・耐荷性 S_{L1} について

補修後の劣化曲線式 $f_i = b_{L1} - a_{L1} t^4$ において、 $a_{L1} = (1/2) \cdot a_{L0}$ 、 $f_o(60) = f_i(60)$ が成立することから、結局補修後の劣化曲線式は次式で表される。

$$f_i = 75 - (1/2) \cdot (50/60^4) \cdot t^4 \quad (10)$$

ゆえに、この床版の補修後の耐荷性からみた余寿命 $t_{L1r.o}$ は、

$$t_{L1r.o} = \sqrt[4]{b_{L1}/a_{L1}} - 60 = 19.0 \text{ (年)}.$$

・耐久性 S_{L1} について

補修後の劣化曲線 $g_i = b_{D1} - a_{D1} \cdot t^3$ において、この年に耐久性の平均健全度が100まで回復することから、補修後の劣化曲線式は式で表される。

$$g_i = 150 - (50/60^3) \cdot t^3 \quad (11)$$

ゆえに、この床版の補修後の耐久性からみた余寿命 $t_{D1r.o}$ は、

$$t_{D1r.o} = \sqrt[3]{b_{D1}/a_{D1}} - 60 = 26.6 \text{ (年)}.$$

③ 床版増厚工法+樹脂注入工法組み合わせ

・耐荷性 S_{L1} について

まず補修を行った場合の劣化曲線式を求めておき、それをさらに補修したと考えれば、結局補修・補強後の劣化曲線式は次式で表される。

$$f_i = 138.9 - (11.1/60^4) t^4 \quad (12)$$

ゆえに、この床版の補修・補強後の耐荷性からみた余寿命 $t_{L1r.o}$ は、

$$t_{L1r.o} = \sqrt[4]{b_{L1}/a_{L1}} - 60 = 52.8 \text{ (年)}.$$

・耐久性 S_{D1} について

耐久性に関しては、これに与える効果は樹脂注入のみを行った場合と同様に計算できる。

d) イニシャルコストについて

図-2中の新設橋梁を対象とする流れについては全く新しい概念であり、イニシャルコストを多く費やして補修・補強費用を安くおさえようとする考え方はまだまだあまり浸透していない。また、イニシャルコストを劣化予測にどのように反映させるかという問題については、現在の劣化予測手法が点検データを与えてはじめて

て成立するという考えのもとに成り立っており、点検データの無い供用開始時において劣化予測を行う手法が確立していないため、イニシャルコストをかけた場合の劣化曲線への影響を現在の劣化予測手法にあてはめていくのは困難であると考えられる。今後、補修・補強の効果を仮定したのと同様に、イニシャルコストをかけた場合の効果を仮定し、供用開始時においても劣化予測が行えるように工夫する必要がある。

イニシャルコストを費やす対象について考えると、補修・補強を行うに至った原因を未然に防ぐという点にコストをかければ補修・補強費を安くするあるいは補修・補強時期を遅らせることができると考えられる。また、イニシャルコストをかけて必要以上に床版厚を厚くしたり、設計基準以上の耐荷力を保持するような構造物をつくることは考えにくい。主に耐久性に関与するような項目、例えばコンクリート表面をエポキシ樹脂などを用いて被覆する、コンクリートのかぶり厚を厚くすることによって塩分・水分の浸入を防ぎ塩害・凍害を防ぐ、混和剤などを利用した高強度のコンクリートを用いる、入念に施工を行う、防錆処理を施した鉄筋を用いる、などにイニシャルコストをかけることが考えられる。

e) 交通規制

橋梁の性能の低下、または補修・補強を行うことを理由にした通行止めあるいは車線規制などの損失を考えることは、BMSの中で最も重要な要素の1つであるといえる。ここでは補修・補強による交通規制費用について考察する。補修・補強による交通規制費用は次式により考慮することにする。

$$C_T = C_L V t \quad (13)$$

ただし、 C_T : 交通規制費用、

C_L : 1台当りの通行止め損失、

V : 一日交通量、 t : 通行止日数

通行止日数は、床版増厚で一週間程度、床版打替えでは2,3ヶ月程度である。1台当りの通行止め損失は、通行料金を利用者から徴収している橋梁であれば基本的には1台当りの通行料金を考えればよいが、そうでない橋梁については適当な係数を用いて仮定する必要がある。

(2) 入力・出力項目

図-3および図-4中の補修・補強の必要性を判定するもととなる情報は、エキスパートシステムのsub goalの出力結果より得る。出力結果の内容は、表-9に示すように、診断結果①~④のそれぞれについて[STATE

表-9 エキスパートシステムの出力例

診断① 損傷度			診断② 補修・補強の必要性		
STATE I	danger	0.121	STATE I	早急に補修・補強が必要	0.424
STATE II	s_danger	0.214	STATE II	補修・補強が必要	0.235
STATE III	moderate	0.226	STATE III	追跡調査が必要	0.211
STATE IV	s_safe	0.423	STATE IV	補修・補強の必要なし	0.110
STATE V	safe	0.016	STATE V	全く問題なし	0.020

診断③ 補修方法			診断④ 補強方法		
STATE I	ひび割れ・断面欠損部共に補修	0.112	STATE I	曲げ・せん断補強	0.467
STATE II	ひび割れの補修	0.140	STATE II	曲げ補強	0.220
STATE III	断面欠損部の補修	0.514	STATE III	せん断補強	0.073
STATE IV	追跡調査	0.186	STATE IV	追跡調査	0.213
STATE V	特に問題なし	0.048	STATE V	特に問題なし	0.027

表-10 対象橋梁の概要と損傷状態

橋梁名	U橋	Y〇橋	YA橋
所在地	兵庫県赤松郡山崎町	兵庫県赤穂郡上郡町与井	山口県厚狭郡浦町
架設年(橋齢)	昭和9年(62年)	昭和31年(40年)	昭和10年(61年)
橋梁形式	RC単純T桁橋	RC単純桁橋	単径間RC単純T桁橋
橋長 / 幅員	17.0m / 5.6m	8.0m / 6.9m	11.0m / 4.10m
損傷状態 *()内は最大ひび割れ幅	<床版の損傷状態> 「支承付近のひび割れ(0.4mm)」 「床版中央のひび割れ(0.35mm)」 「鉄筋の腐食」 「コンクリートの欠落」	<床版の損傷状態> 「ハンチ沿いひび割れ(0.3mm)」 「支承付近のひび割れ(0.3mm)」 「床版中央のひび割れ(0.3mm)」	<主桁の損傷状態> 「鉄筋腐食ひび割れ(0.4mm)」 「曲げひび割れ(0.05mm)」 「遊離石灰」 「コンクリートの欠落」
荷重状態	厳しい	あまり厳しくない	あまり厳しくない
目視による損傷程度	かなり大	小	中～大

I]～[STATE V]までの5段階に分類された状態について、各STATEの正規化された支持率をもって表されるものである²⁾。ただし、両図中の診断①～④は、表-9のものと対応している。例えば、床版の場合を例にとると、まず、ひび割れ、断面欠損部の全体的損傷の診断結果を入力し、これがもし表-9の診断②のようであれば、「早急に補修・補強が必要」ということになり、次へ進む。次に耐荷性の診断結果が、表-9の診断①のようであれば、耐荷性は「s_safe」であることが分かるので維持管理対策としては補修を中心に考えればよいことになり、次へ進む。次に、補修方法についての診断結果が、表-9の診断③のようであれば、補修工法として断面修復工法を選定し、補修費用と補修後の余寿命の予測を行い、画面に表示する。ここで、維持管理対策として「鋼板 (FRP) 接着、床版増厚、縦桁増設」の3つの補強工法が選ばれた場合などは、すべての工法について費用、補強後の余寿命、補修と組み合わせを行った場合の余寿命、その工法がどのような条件のときに有効であるかなどを画面上に示し、システムを利用する側が最終的に工法を選択するための助けとなるようにする。そして、補修前後での予想劣化曲線を描くためのデータファイルの作成も同時に行う。

主桁の補修工法は、主に樹脂注入、断面修復の2つを用いるが、このほかにガラスクロス、モルタル吹き付け工法も有効であるとし、選択肢として加えることにする。さらに、対象橋梁の予定供用年数を設定すると、その年数を満足する維持管理対策の組み合わせを本システムですべて検索し、その中で総費用が最小となる組み合わせを示す。

5. 本BMSの出力結果に対する考察

前章までに述べた事項を基に、C言語ソフトを用いて実際にBMSを構築し、表-10に示す「U橋」、「Y〇橋」および「YA橋」の3つの橋梁についてのエキスパートシステムの出力結果をサンプルの入力データとして、実際にシステムを実行した。

(1) 補修および補強効果

橋齢と耐荷性、耐久性の平均健全度を入力すると、劣化予測式を用いて補修・補強を行わなかった場合のこれらの橋梁の床版と主桁それぞれに対する耐荷性、耐久性からみた余寿命が計算され、結果が画面に表示された。表-11および表-12に、一例として、「U橋」、

表-11 「U橋」床版の余寿命の出力結果の比較

余寿命システム	耐荷性からみた余寿命	耐久性からみた余寿命
本BMS	12.70年	8.43年
エキスパートシステム	10.98年	

表-12 「Y〇橋」床版の余寿命の出力結果の比較

余寿命システム	耐荷性からみた余寿命	耐久性からみた余寿命
本BMS	9.70年	13.04年
エキスパートシステム	18.44年	

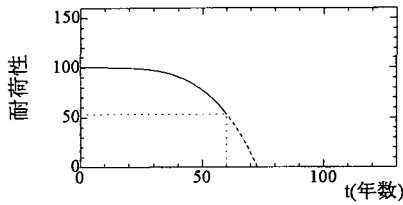


図-5 「U橋」床版の予想劣化曲線

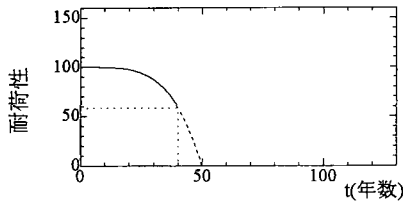


図-6 「Y〇橋」床版の予想劣化曲線

表-13 「U橋」床版の補修による余寿命の変化

余寿命対策	耐荷性からみた余寿命	耐久性からみた余寿命
補修なし	12.70年	8.43年
補修あり	20.93年	21.25年

「Y〇橋」の床版について、本BMS中での余寿命予測とエキスパートシステムの出力結果での平均余寿命を比較したものを示す。表-11をみると、橋齢の古い「U橋」に関していえばそのまま補修・補強を行わなかった場合の耐荷性、耐久性それぞれからみた本BMSでの余寿命予測が、エキスパートシステムの出力とほぼ一致した値を示していることが分かり、本BMSでの劣化予測手法が橋齢のある程度古いものについてはほぼ妥当な結果を示すと考えられる。ところが、表-12をみると、橋齢の比較的若い「Y〇橋」に関していえば本BMSで計算された余寿命がエキスパートシステムの出力結果での余寿命をかなり下回っているという結果となっており、橋齢の比較的新しいものに対しては余寿命を過小評価し

ているという結果となった。また、同様な傾向が主桁においてもみられた。この点については、今後、橋梁技術者へのアンケート調査を通じてエキスパートシステム自体を洗練するか、もしくは劣化予測式を修正して妥当な結果が得られるように改良する必要がある。

このようにして、橋齢と平均健全度の入力が終わると、これらの床版をそのまま補修・補強を行わないでいた場合の予想劣化曲線をグラフ作成ツールを用いて描くためのデータが該当するファイルに次々に編集された。図-5および図-6に、実際にこのツールを用いてこれらのデータを視覚的に表現したものを示す。

さらに入力を続け、図-3に従って補修・補強が必要かどうかの判定を行った。まず「U橋」については、最終的に断面修復工法による補修が現時点で最も効果的な維持管理対策であるという結果が得られ、補修後の余寿命予測が行われた。表-13に、補修を行わない場合と補修を行った場合の余寿命予測を比較したものを示す。これより、補修によって耐久性からみた余寿命が耐荷性からみた余寿命と同程度にまで延びており、効果的な維持管理が行えたといえる。次に「Y〇橋」について入力を行ったところ、現時点で「補修・補強の必要なし」という結果が得られた。しかし、余寿命を長く見積もっているエキスパートシステムの出力での余寿命予測でさえ、あと18.44年でこの床版は使用限界に達すると診断しているにもかかわらず、本BMSでは「補修・補強の必要なし」と判定され解析が終了してしまっているという点で、判定のプロセスに少し問題があると考えられる。今後、もう少し補修・補強を行う必要があると判定する方向にフローが流れるように工夫し、補修・補強の必要が少しでもあるときにはその必要性を指摘できるように改良して、補修・補強を怠ったことが原因となって事故などが起こることのないようにしなければならない。

さらに、本BMSの補強に関する部分の出力の妥当性を確かめるために、「U橋」および「Y〇橋」の床版に対して各種補強工法を適用したときの、補強後の余寿命の変化を本BMSを用いて求めることにした。その結果の一例を「U橋」については表-14に、「Y〇橋」については表-15にそれぞれ示す。これらの表に各工法の費用を加えた表をBMSの出力画面で実際にユーザーに示し、これを参考にして最もよい補強工法を選択し、同時に補修も組み合わせて行うかどうか選択できるようにしてある。表-14および表-15より、耐荷性の劣化に対して最も効果的な工法は床版打替え工法を除けば床版増厚工法であり、これに樹脂注入工法あるいは断面修復工法を組み合わせて行うことによって飛躍的に余寿命が延びることがわかる。ところが、床版増厚工法あるいは床版打替え工法を採用すれば交通規制費用がかかり、交通

表-14 「U橋」床版の補強による耐荷性からみた余寿命の変化

対策 \ 工法	鋼板接着(FRP4)	FRP2枚接着	床版増厚	縦桁増設	床版打替え
補強のみ	35.19年	28.13年	38.53年	24.38年	38.53年
補強+補修	50.90年	41.87年	55.11年	36.62年	55.11年

表-15 「Y〇橋」床版の補強による余寿命の変化

対策 \ 工法	鋼板接着(FRP4)	FRP2枚接着	床版増厚	縦桁増設	床版打替え
補強のみ	25.18年	20.34年	27.47年	15.09年	27.47年
補強+補修	36.10年	29.96年	38.96年	23.10年	38.96年

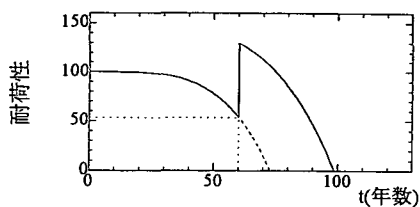


図-7 「U橋」床版に工法①を適用した場合

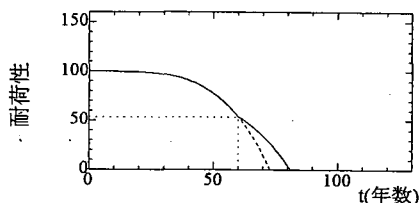


図-8 「U橋」床版に工法②を適用した場合

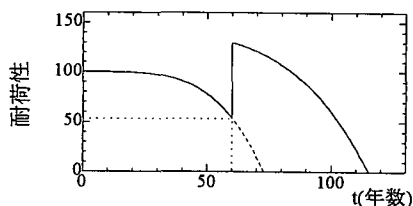


図-9 「U橋」床版に工法③を適用した場合

表-16 「YA橋」主桁の余寿命の出力結果の比較

システム \ 余寿命	余寿命	
	耐荷性からみた余寿命	耐久性からみた余寿命
本BMS	14.82年	8.20年
エキスパートシステム	10.93年	

量の多い主要な橋梁であれば維持管理費用が高くなってしまふ。もし交通規制を行えないのならば、必要な

余寿命と予算の制約条件などを満足する別の工法を選択しなければならない。また、例えば架け換えまでの何年かだけ使用に耐え得るようにしたいが予算が少ししかないといった場合にも費用が安価で規定の年数だけ使用に耐え得る工法が選択できる。このようにして、例えば補強工法として前述「例2」に示した①～③の3種類の補修・補強工法を選択し、「U橋」の床版に適用した場合の予想劣化曲線をグラフ作成ツールを用いて描いたものを①床版増厚工法については図-7に、②樹脂注入については図-8に、③床版増厚、樹脂注入組み合わせについては図-9にそれぞれ示す。これを見ると、補強を行う際に補修を組み合わせると、より効果的に余寿命を延ばすことができることがわかる。これらの例については、補修・補強後の余寿命が専門家の実際の感覚にほぼ一致し、補修・補強の効果を妥当に評価できていると考える。

(2) 維持管理対策の最適化

維持管理対策の最適化は、その指標として経済性、安全性、機能性、環境性等を総合して考慮すべきであるが、本研究では、その第一段階として比較的数量化が容易な費用の比較によって対策工の最適化を試みた。

本BMSでは、エキスパートシステムの出力結果から点検を行った時点での補修・補強の必要性を判断し、必要ならば工法選択を行う。またさらに、対象橋梁の予定供用年数を設定するとその年数を満足する維持管理対策の組み合わせを本システムですべて検索し、その中で総費用が最小となるものを最適な維持管理対策として示すことができる。ここで、総費用は、維持管理対策として選択された工法の合計費用である。なお、ここでは一例として、維持管理対策は5年周期で考慮するものとし、補修・補強を行う回数は、それぞれ最大で補修2回、補強1回と限定している。

上述の最適化の実行情例を表-10に示した「YA橋」主桁を対象として示してみる。「YA橋」は、橋齢が61年であり、ほぼ一般的に考えられている設計耐用年数に至っており、目視点検の結果、損傷程度が著しい橋梁

表-17 維持管理対策と費用の関係 (予定供用年数100年の場合)

対策	橋齢(年)	維持管理対策	予想寿命(年)	費用(U)
1	61	FRP2枚(補強)+補修	106.55	115.8
2	61	樹脂注入, 断面修復(補修)	109.31	115.8
	71	FRP2枚(補強)		
3	61	外ケーブル工法(補強)	102.76	150.0

表-18 維持管理対策と費用の関係 (予定供用年数120年の場合)

対策	橋齢(年)	維持管理対策	予想寿命(年)	費用(U)
1	61	樹脂注入, 断面修復(補修)	125.52	153.6
	66	樹脂注入, 断面修復(補修)		
	71	FRP2枚(補強)		
2	61	外ケーブル工法(補強)+補修	120.27	187.8

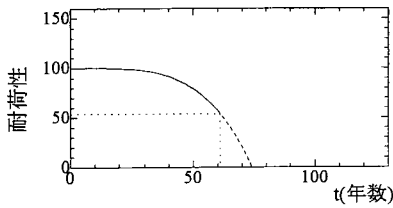


図-10 「YA橋」主桁の予想劣化曲線

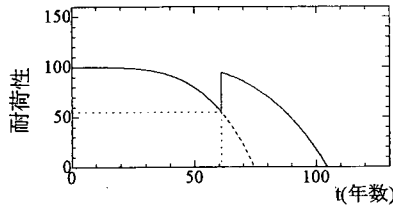


図-11 「YA橋」主桁の予想劣化曲線
(予定供用年数100年の場合)

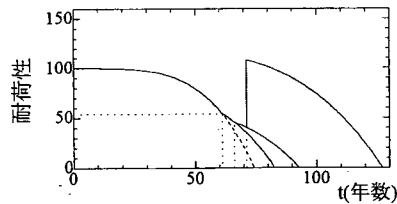


図-12 「YA橋」主桁の予想劣化曲線
(予定供用年数120年の場合)

耐久性の平均健全度の入力が終わると余寿命が計算され、主桁をそのまま補修・補強を行わないでいた場合の予想劣化曲線(図-10)が画面に表示された。

表-16は、本BMSとエキスパートシステムの余寿命を比較したものである。この表から、本システムは前述した床版と同様に、主桁においても比較的古い橋梁に適用した場合は妥当な結果を示すことがわかる。さらに入力を続け、エキスパートシステムからの出力結果を基に補修・補強が必要かどうかの判定を行ったところ、「YA橋」の主桁は現時点で「補修・補強の必要あり」という結果が得られた。最後に、予定供用年数を100年あるいは120年と設定すると、その年数を満足し総費用が最小となる維持管理対策を表示した。本BMSでは、上位3つまでの維持管理対策(対策工)を提示できるようにしてある。表-17は、予定供用年数100年と設定した時の結果である。この「対策1」と「対策2」を比較すると、補修・補強を行う時期は異なるが、維持管理対策の内容が同じであるためその費用は等しい。しかし、予想寿命は、「対策2」の方が延びることがわかる。

一方、予定供用年数を120年と設定した結果は、表-18に示す通りである。ここでは、設定条件を満足する維持管理対策は2つのみであった。表-17および表-18の「対策1」に対する予想劣化曲線は、それぞれ図-11および図-12である。ここで、図-11は予定供用年数が100年の場合を示しており、維持管理対策を行う時期は、橋齢が61年のときであり、その対策としては、FRP(2枚)接着工法で補強を行い、それと同時期に断面修復工法や樹脂注入工法で補修を行うものである。図-12は予定供用年数を120年に延ばした場合を示しており、維持管理対策を行う時期は、橋齢が61,66,71年であり、その対策としては、断面修復工法と樹脂注入工法を行う補修を2回を行い、その後FRP(2枚)接着工法で補強を行うものである。これらのことより、設定した予定供用年数

であると判定されている。本システムに橋齢と耐荷性、

を満足する維持管理対策の費用最小化を指標とした最適化が行われていることがわかる。

6. 結言

本研究は、橋梁の維持管理を最適に行うためのシステム“Bridge Management System(BMS)”の開発を行うにあたり、まずその基礎となる概念の部分から様々な検討を重ね、それをもとにBMSのプロトタイプを作成することを試みたものである。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

①BMSを開発するに当たり、関連用語の定義をはじめとする様々な基本的事項について整理した。主に橋梁部材の性能を表す指標として耐荷性、耐久性の2つを用い、補修・補強の区別を明確にしたことが特徴としてあげられる。

②橋梁部材の性能の劣化を予測する手法として劣化曲線を提案し、劣化曲線式の作成に際して種々の仮定を設けることによって補修・補強後の劣化予測も行えるようにした。

③BMSのプロトタイプを作成し、これまで確定している事項をC言語を用いたプログラムによって表現した。また、提案した劣化曲線をグラフ作成ツールを用いて視覚的に表現することができた。

④本BMSを3橋の実橋に適用した結果、補修、補強が必要な橋梁に対して各種対策工を実施する場合の余寿命に及ぼす対策効果の評価および経済性(費用)に着目した維持管理対策の最適化をある程度行えることを確認した。

最後に、本BMSをより実用的にするためのこれからの解決すべき課題として、BMSの基本となるエキスパートシステムによる診断結果の信頼性を高めること、建設費(イニシャルコスト)をかけることによるメリットを評価するために、今後はLife Cycle Costを考慮に入れた最適維持管理計画を考える必要があることなどが

挙げられる。

謝辞：本研究のまとめにあたり、種々の援助を頂いた山口大学大学院生 河村 圭、山岡健一両氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:「道路橋」に関する地区講習会講義要旨, pp.104-111, 1994. 2.
- 2) 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.
- 3) OECD Scientific Group: Bridge Management, *OECD Research Report*, 1992. 12.
- 4) P. D. Thompson : PONTIS- The Maturing of Bridge Management Systems in the USA, *Bridge Management*, Vol. 2, pp. 971-978, 1993. 4.
- 5) U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: *PONTIS- Technical Manual* -, 1993. 12.
- 6) W. Straninger & M. Wicke: New Bridge Inventory System in Austria, *Bridge Management*, Vol. 2, pp. 859-869, 1993. 4.
- 7) A. Legosz & A. Wysokowski: General Information on a Polish Bridge Management System, *Bridge Management*, Vol. 2, pp. 870-879, 1993. 4.
- 8) 阪神高速道路公団: 道路橋の保守管理の最適化手法について, コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会資料, 1994. 8.
- 9) 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, 1995. 10.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) (財)首都高速道路協会: 床版補強の設計施工に関する調査研究(その1)報告書, 1977. 3.
- 13) 阪神高速道路公団 保全施設部: 保全関係ハンドブック, 1994. 7.
- 14) 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. 12.

(1996. 5. 10 受付)

DEVELOPMENT OF BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM(BMS)

Ayaho MIYAMOTO, Moriyoshi KUSHIDA, Yukio ADACHI and Masato MATSUMOTO

Recently, the necessity of developing a practical bridge management system has been pointed out because the maintenance of bridges, a key element of the highway networks, has become a major social concern. This paper describes a newly developed bridge management system(BMS) for deteriorating concrete bridges taking advantage of the output from a concrete bridge rating expert system which is currently being developed. Furthermore, a few numerical examples for some existing concrete bridges are presented so as to demonstrate the suitability of the proposed bridge management system based on lifetime cost minimization approach.