

11.7 積雪寒冷地における土木施設のマネジメント手法に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：石川博之、西弘明、三田村浩、佐藤京、安達優

【要旨】

北海道開発局の管轄橋梁は確実に高齢化が進んでおり、近い将来、維持補修事業が急増することが予想される。そのため、LCC (Life Cycle Cost) の低減を目指した効率的な維持管理計画の策定が不可欠である。このような背景から、当チームでは効率的な橋梁補修計画の策定を支援するシステムの研究を進めてきた。維持管理計画の策定には劣化予測精度が重要である。本システムでは北海道内で得られた過去の直轄橋梁点検結果から統計的に算出した遷移確率行列を劣化予測に用いている。これは、雪寒冷地である北海道での橋梁の劣化特性を考慮した予測手法と言えるが、これを更新するためのデータ収集には多くの時間を要する。一方、当チームは輪荷重走行試験による RC 床版の余寿命予測に関する研究を行ってきた。そこで、本研究では疲労試験より得られた劣化予測手法をシステムへ導入することに関する検討を行った。

キーワード：優先順位、橋梁維持管理システム (BMS)、予防保全型補修、事業計画

1. はじめに

北海道開発局では現在 3,000 以上の橋梁を管理している。そのうちの多くが高度経済成長期に建設され、三十数年から四十年を経過しており、橋梁の余寿命等を考えると、近い将来橋梁の維持補修事業の大幅な増加が予想される。一方、今後の厳しい財政状況を鑑みると、限られた公共事業予算の中で、3,000 以上の管理橋梁に対して、効率的かつ効果的な維持管理計画を立案することが必要となるとともに、社会情勢より予算要求や利用者への説明責任が要求される。

そのような背景から将来の老朽橋梁の増加と経済情勢を鑑み、橋梁の健全度を評価する機能と劣化を予測する機能を有し、効率的な維持管理計画の立案を支援する橋梁維持管理システム (CBMS: CivilEngineeringResearchInstitute Bridge Management System) の構築を行っている¹⁾。本システムにおける部材の劣化予測は、過去 15 年間に蓄積された北海道開発局の橋梁点検結果を基に、マルコフの遷移確率行列式を用いて行っており、継続的にデータを蓄積することによって、北海道での劣化特性を考慮した劣化予測精度の向上が期待できる。

一方、当チームでは劣化損傷した床版を用いた輪荷重走行試験により積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性、余寿命予測に関する研究を行っており、積雪寒冷地での複合劣化を考慮した力学的観点からの劣化予測も検討していることから、さらなる精度の向上も期待できる。

本報告では、本システムで導入している劣化予測手法についてまとめるとともに、RC 床版の輪荷重走行試験結果に基づく劣化予測手法のシステム化に関する検討結果についてとりまとめた。

2. CBMS のプロトタイプシステムの概要

本システムの目的は、限りある補修予算を有効に用いるため、いつ、どの部材を、どのような工法で補修を行えば良いかを最適化し提案することにある。この目的を達成するためには、まず、橋梁の現在の健全性を的確に把握した上で、今後どのように劣化が進むかを想定する必要がある。本システムは、橋梁の現在の健全性と今後の健全度の推移を定量的に評価する機能「健全度評価」、 「劣化予測」を有し、その結果を元に最適とされ

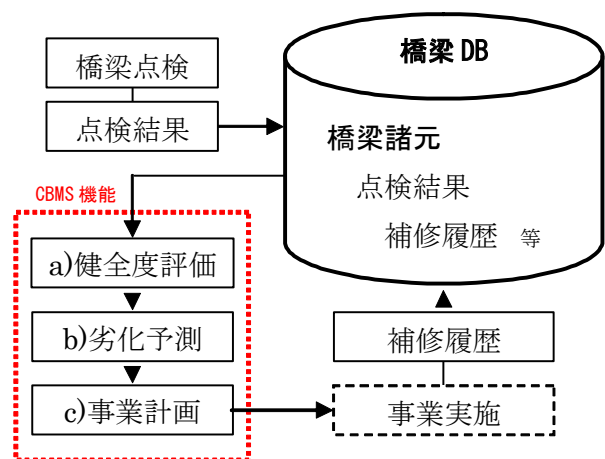


図1 CBMSの概要

る補修時期，補修工法を選択し，補修費用の算出を行う「補修事業計画」の機能で構成されている．ここで，本システムの処理フローを図1に示すとともに，以下に，主な機能の概要を示す．

2. 1 健全度評価手法

CBMS では，橋梁健全度を評価する手法として米国で用いられている PONTIS²⁾ を参考に，橋梁健全度指数(BHI : Bridge Health Index)を評価する手法を導入している．

橋梁構造物は，社会資本における道路ネットワークの重要な構成要素としての役目を果たしている．その機能は，最小の維持管理経費等で長期的に安定するよう求められはじめ，社会経済的側面においても橋梁は重要となっている³⁾．このような背景から，橋梁の健全度評価手法として，橋梁の構造各部の資産的価値（建設費用）に着目して，資産価値を用いるとともに，点検結果から得られた損傷ランクを資産価値の低下を示す指標とした評価方法を導入している．評価を行うにあたっては，橋梁定期点検要領（案）⁴⁾を（旧橋梁点検要領（案）⁵⁾）基に全国での国道橋に対して統一的な評価手法にて行われている橋梁点検結果を用いることが的確であると考えた．

BHI は，橋梁各部材の資産評価価値に着目して，橋梁全体の建設当初の総資産価値に対する，供用後の現在の残存資産価値（現在資産）の比として式(1)のように表される．

$$BHI = \text{現有資産} / \text{初期資産} \dots \dots \dots (1)$$

ここで，

現有資産：現在（部材に損傷を有する状態）の橋梁全体の建設費

初期資産：全ての部材が健全な状態（建設当初）の橋梁全体の建設費

橋梁全体の現有資産の評価は，各部材の現有資産の総和として考え，各部材の現有資産は橋梁点検結果による物理的劣化を資産の低下と見なし算出する．この物理的劣化を定量的に示す指標として，表1に示すように旧要領の損傷ランクごとに健全度指数（Wfi）を設けた．各部材の現有資産は各部材の初期資産に健全度指数を掛け合わせることで算出するが，点検時においては必ずしも1部材に対し損傷ランクが1つとは限らない．

表 1 健全度指数対応表

| 損傷ランク | OK | IV | III | II | I |
|-------------|------|------|------|------|------|
| 健全度指数 (Wfi) | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 |

表 2 健全度算出例

| 損傷ランク(i) | OK | IV | III | II | I | EHI | 全数量 | 単位 | 部材単価 | 初期資産 | 現有資産 |
|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----------------|------|---------|--------|
| 健全度指数 (Wfi) | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 | (A) | (B) | (C) | (D) | (E) | (E) |
| 部材名 | 損傷ランクiの数量割合 | | | | | (A) | (B) | (C) | (D) | (E) | (E) |
| 主桁 | 0.000 | 0.250 | 0.562 | 0.188 | 0.000 | 0.516 | 60 | t | 500 | 30,000 | 15,465 |
| 床版 | 0.700 | 0.200 | 0.100 | 0.000 | 0.000 | 0.900 | 10 | t | 300 | 3,000 | 2,700 |
| 床版 | 0.500 | 0.125 | 0.187 | 0.187 | 0.000 | 0.735 | 320 | m ² | 50 | 16,500 | 12,119 |
| 橋台 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 700 | m ² | 60 | 42,000 | 26,250 |
| 橋台基礎 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 300 | m ² | 55 | 16,500 | 16,500 |
| 橋脚 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.875 | 200 | m ² | 60 | 12,000 | 10,500 |
| 橋脚基礎 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 100 | m ² | 55 | 5,500 | 5,500 |
| 支保 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 8 | 橋 | 1000 | 8,000 | 5,000 |
| 高欄 | 0.000 | 0.800 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.700 | 60 | m | 30 | 1,800 | 1,260 |
| 防護欄 | 0.000 | 0.800 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.700 | 60 | m | 30 | 1,800 | 1,260 |
| 舗装 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 10 | m ² | 60 | 600 | 600 |
| 舗装 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 300 | m ² | 4 | 1,200 | 750 |
| 伸縮装置 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.375 | 20 | m | 50 | 1,000 | 375 |
| 合計 | | | | | | | | | | 139,900 | 98,279 |

BHI = 98.279/139.900 = 0.702

そのため，各損傷ランクが存在する数量の割合を考慮し，式(2)のように総和として算出する．この値を1部材全体の健全度指数とし，これを部材健全度（EHI）と呼ぶ．

以上より，各部材の現有資産はEHIを用いて式(3)のように表わされる．

$$EHI = \sum (\text{損傷ランク } i \text{ の数量割合} \times Wfi) \dots \dots (2)$$

ここで，

i：損傷ランク（OK～I）

Wfi：損傷ランクごとの健全度指数

$$\text{部材の現有資産} = \text{部材の初期資産} \times EHI \dots \dots (3)$$

ここで，部材の初期資産は式(4)のように算出するが，算出に用いる部材単価は，前述したように，現在と将来の資産の比率として用いることを目的としていることから，経年による物価の変動や，社会的割引率等による価格変動は考慮せず一定としている．

$$\text{部材の初期資産} = \text{部材単価} \times \text{部材数量} \dots \dots (4)$$

これらを橋梁13部材に対し，それぞれ部材健全度の算出を行うが，荷重を支持するなど重要な役割を持った部材が，形状保持を目的とする2次部材よりも重要性が高いことに着目した場合，部材毎の重み付けが必要となるものと考えられる．多種多様な部材や材料で構成される橋梁では，部材の重み係数を決定するのは難しいが，CBMSでは主桁や床版のように，部材の重要度が高いほど建設費が高く，高欄等の橋梁構造部材としての重要度が低い部材は建設費も安価と考え，部材の再

調達価格の考えを用いることで部材の重要度がBHIに反映している。

本項において述べた健全度評価手法による健全度の算出例を表2に示す。

2.2 劣化予測手法

橋梁に限らず土木構造物においては、建築分野における設備等で用いられる減価償却といった考え方はなじみにくく、架け替えや補修等の事業実施時期を決定するには、管理する構造物の健全度に下限値を定め、将来の健全度がそれらを下回った段階で補修時期とすることが理解しやすい。また、過去の点検結果を元に、今後の補修事業費を推定するためには、点検時あるいは補修時の健全度を基に、現在の健全度を推定する必要もある。

構造物の劣化予測は橋梁を構成する部材の材料に着目した場合、コンクリートでは塩化物イオン濃度、中性化深さ、塩分付着量、アルカリ骨材反応、耐荷性を考慮した検討があり、鋼材では腐食面積率、塗装の膜圧測定、板圧測定結果を評価することで、劣化予測が可能となっている。このことから個々の部材に対しては、詳細な調査や設計資料から必要となる条件を揃えることで理論的に劣化予測が可能である。また示方書や診断マニュアルなどの理論式を用いることでも個別の対応は可能となっている。しかし、実構造物の損傷は複合的に生じている場合が多く、その要因解明にはサンプルの採取や実橋での調査等が必要となり多くの時間を要する。現在の社会情勢を考慮した場合、多くの時間と費用のかかる調査をすべての橋梁に対して実施することは困難である。加えて架設年次の古い橋梁では、設計資料がそろわないケースもあり、机上の予測も難しい場合がある。したがってBMSへ劣化予測を適用する場合は、予測のモデル化や実験結果から導き出した回帰式、標準的な理論式の利用、マルコフ理論などの確率論、エキスパートや遺伝的アルゴリズムなどを利用する手法が取られている。CBMSはこのうち、単純マルコフ理論に着目した劣化予測手法を導入した。

(1) マルコフ過程

国道に架橋されている橋梁の点検は、近接目視により実施されている。確認される損傷は、いくつかの劣化要因により損傷が発生している複合劣化の場合は、損傷要因別の劣化式を選定する

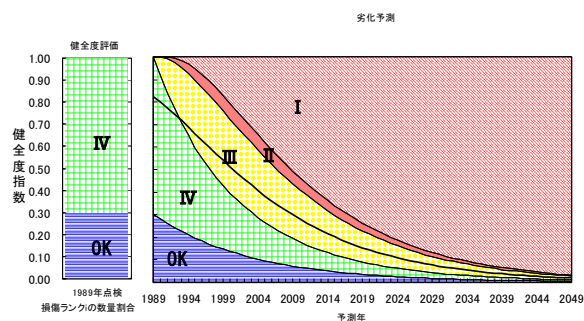


図2 健全度評価結果と劣化予測への移行

のは困難である。また、劣化要因に着目した予測式や確率的劣化曲線では、点検ランクに沿った複合劣化による損傷状態を複数の予測式での値と関連づけることが困難であると言える。

しかしながら、2.1項で述べた健全度評価手法を用いれば、複合劣化の状態を加味した健全度評価として表すことができ、その結果がそのまま劣化予測の初期値として利用可能である。例えば図2の劣化予測結果(太い実線)を床版劣化予測の例に当てはめると、床版の各パネルの損傷ランクをそのパネル数に応じて平均した予測の結果となる。すなわち1989年には全パネルのうち約70%が損傷ランクIV(損傷係数0.75)、30%がOK(損傷係数1.00)で床版全体としての健全度が $0.825 (=0.75 \times 0.7 + 1.00 \times 0.3)$ であったものが時間の経過とともに各損傷ランクのパネル数の変化として推移し、健全度が低下する状況が理解できる。点検による健全度の評価結果は、ひび割れや腐食といった損傷状態を種類分けしてそれぞれランク付けしている。

以上のように、マルコフ理論に基づいた遷移確率を用いる手法は、劣化予測を損傷ランク毎に推定可能であり、平均化された健全度の推移だけではなく、損傷の大きさ、範囲などを考慮した予測が可能であることから導入した。

(2) 遷移確率算出手法

劣化の進行を表す遷移確率行列は、昭和63年から平成14年までの15年間に3369橋(複数回点検含む)に対して実施された橋梁点検の結果を用い、新旧の点検結果から損傷ランクの比較を行い、健全度低下の推移を集計することで算出したものである。劣化予測の集約単位は、主桁と横桁や対傾構で区分された床版パネル単位に集約し、ランクごとに比率を算出している。図3には、その比較集計した床版下面の劣化推移をパネル毎

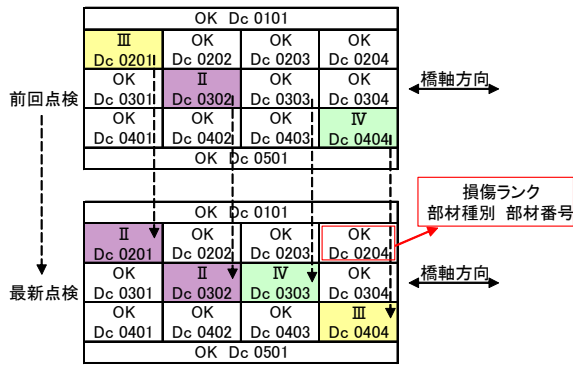


図3 劣化状況イメージ(床版下面の点検結果)

表3 床版の遷移確率年(N)

| | OK | IV | III | II | I |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| OK | 9.730 | | | | |
| IV | | 5.470 | | | |
| III | | | 6.060 | | |
| II | | | | 1.000 | |
| I | | | | | 1.000 |

表4 床版の遷移確率(P)

| | OK | IV | III | II | I |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| OK | 0.931 | 0.069 | | | |
| IV | | 0.881 | 0.119 | | |
| III | | | 0.892 | 0.108 | |
| II | | | | 0.500 | 0.500 |
| I | | | | | 1.000 |

に比較したイメージを示している。前回の点検結果と最新点検結果を比較し、ランクの推移を部材要素別部材番号毎に整理を行っている。このように1パネルを1部材とし、それぞれのパネルに対して劣化を追跡する方式を採用し、新たに集計した結果を基に遷移確率を算出した。なお、前回の点検結果より損傷ランクが高くなっている(健全性が回復している)データは補修、補強の結果として除外している。

(3) 遷移確率算出結果

(2)で述べた算出手法に基づき、コンクリート床版についての遷移確率を算出した結果を以下に示す。

表3, 表4はそれぞれコンクリート床版の遷移確率年と遷移確率を示したもので、損傷ランク毎の劣化速度(年)の違いを把握することができる。遷移確率算出に用いたデータは48053部材を対象とした。例えば表3の遷移確率年 N(IV, IV)=5.470は全データ48053個のうち各点検間隔においてIVがIVに留まっていたデータ数の統計分析により経過年毎に現状に留まる年数を示す。そして、表4の遷移確率 P(IV, IV)=0.881はN(IV,

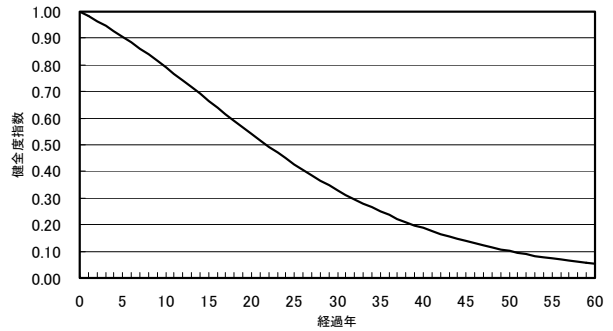


図4 コンクリート床版の劣化予測結果

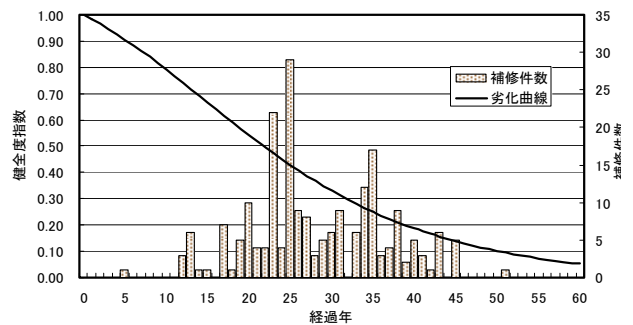


図5 コンクリート床版の補修実績との比較

IV)の5.470年を基に、IVが翌年にIVに留まっていた確率に換算したものである。ここで、N(I,I)の1.000は、計算上は無窮大となるが、実際のデータでは、この項は分析の対象外としているため、便宜上1.000としている。図4は表4の結果を縦軸に健全度指数、横軸に経過年とした健全度指数の経年推移を劣化予測式としてグラフ化したものである。このグラフから35年後には健全度指数が0.25となることを示している。これは表2に示すように損傷ランクIIに相当するもので、橋梁点検要領(案)では「損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。」と判定されるランクである。

(4) 補修データとの相関

図5は、図4に折れ線グラフで示した劣化予測結果と一緒に、コンクリート床版の経過年毎の補修件数を棒グラフで示したものである。

参考とした補修データは北海道開発局で取りまとめたものである。これまで北海道開発局にて実施されてきた補修は、損傷が顕著となってから補修を行う対症療法的なものが主であることから、図5に示す補修データにおいてもその様な考えをもとに実施されてきた結果であると考えられる。一方でCBMSにおける対症療法的補修は

主に健全度指数でいう0.5から0.25に設定しているため、劣化曲線により経過年に換算すると22年から35年の13年間となる。この13年間で補修された割合は全体6割を占めることから、この劣化曲線の妥当性を示す一指標になると考えられる。

2.3 事業計画

CBMSにおいて立案する補修事業計画は、あらかじめ設定した部材と損傷ごとに劣化予測後の健全度に応じた補修工法に基づいて作成される。補修年の算出方法としては、補修事業計画シナリオの設定によって補修工法の選定が変化し、選定された補修工法に設定された健全度まで劣化予測後の健全度が低下した時点で補修が推奨される。管理者により事業費との兼ね合いなどから推奨通りに事業を実施できない場合が生じることが考えられるが、その際には、管理者が補修時期を遅らせたり、補修工法を変更させたりするなどのシミュレーションをすることが可能で、その後の計画は変更内容に対応し、最適とされる補修計画を自動立案する仕様となっている。

管理レベルに対応した補修事業計画シナリオとしては、至急対応が必要なランクに損傷が進む直前で補修を実施する「対症療法的な補修事業計画」と、損傷の早い段階で、より長寿命化が可能な工法で補修する「予防的な補修事業計画」を設定しているが、これら2種類の補修事業計画シナリオでは、「予防的な補修事業計画」が、ライフサイクルコストの低減につながるとの見解が示されている⁶⁾。特に本システムでは、これら2種類のシナリオにより、現在管理している実橋梁のデータを基に、その違いを明確にする事ができるため、補修事業計画立案に有効と考える。

3. 実験的 RC 床版劣化予測手法

前述のように CBMS の劣化予測は統計的に確率論で算出しているため、その精度は母集団に大きく影響される。劣化予測精度の照査を行うためには、より多くのデータを収集する必要があるが、北海道開発局において1年間で実施される点検橋梁数は約800橋と限られており、データの蓄積を待たなければならない。他に精度の照査を行う方法として、異なる理論から算出された劣化予測手法との比較を行うことが考えられる。

一方、RC床版の疲労損傷メカニズムは輪荷重走行試験機を用いた過去の研究で明らかとなってきた⁷⁾。さらに、筆者らは道内の供用橋梁から積雪寒冷地特有の劣化作用を受けている床版を切り出し、輪荷重走行試験機による疲労試験を行い、その疲労耐久性について検討している。これらの耐荷性状の面からの研究の蓄積によりRC床版の余寿命予測について検討を進めている。

そこで、これまで蓄積された実験結果から得られた余寿命予測手法をCBMSに導入することを目的に、導入にあたっての課題とその対処法について検討した。

3.1 輪荷重走行試験結果による余寿命予測

筆者らが行ってきた実験により算出した余寿命予測式(案)は式(5)のように表される。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.33 \cdots \cdots (5)$$

ここで、

P : 任意の輪荷重(kN)

P_{sx} : 梁状化した押抜きせん断力(kN)

$$P_{sx} = 2 B (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m)$$

B : 梁状化したときの梁幅(mm)

$$B = b + 2d_d$$

b : 載荷板の配力筋方向の辺長(mm)

d_d : 引張側配力筋の有効高さ(mm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(kN/mm²)

$$\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$$

X_m : 引張側コンクリートを無視した場合の圧縮側から中立軸までの距離(mm)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張り応力度(kN/mm²)

$$\sigma_{tmax} = 0.583 \sigma_{ck}^{2/3}$$

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度(kN/mm²)

C_m : 主鉄筋のかぶり厚さ(mm)

N : 実験による破壊回数

実橋において1年間に荷重 P_1, P_2, \dots, P_n がそれぞれ n_1, n_2, \dots, n_n 回作用する場合、これら全ての荷重による繰返し載荷を、任意に設定し基準とする輪荷重 P_0 に変換した等価繰返し回数は式(6)で表される。また、式(6)の等価繰返し回数と一定荷重 P_0 によって実験を行った破壊回数 N_f との比が疲労予測の基準式(7)となる。

詳細調査パネルの損傷ランク判定表

| ランク | 項目 | ひびわれ間隔・形状 | ひびわれ幅 (ヘアークラック) | ひびわれ密度 |
|-----|----|--------------------------------|--|-----------------------|
| 0 | | 1.0 m 以上 1 方向のみ | 0.06 mm 以下 | |
| I | | 1.0~0.5 m 1 方向が主で直角 方向は従 | 0.1 mm 以下が主で あるが一部に0.1mm 以上も存在する | 2~4 m/m ² |
| II | | 0.5 m 程度 格子状直前のもの | 0.2 mm 以下が主で あるが一部に0.2mm 以上も存在する | 4 m/m ² 程度 |
| III | | 0.5~0.2 m 格子状 | 0.2 mm 以上かなり 目立ち部分的な角落 ちもみられる | 4~8 m/m ² |
| IV | | 0.2 m 以下 格子状 | 0.2 mm 以上が目立 ち連続的な角落ちが 生じている | 8 m/m ² 程度 |

注) 本書ではこの判定法を、損傷を多角的にとらえる目的において、参考データとして使用している。したがって、用いる際には十分注意し基本的判定法を補足する程度に用いるがよい。

図6 ひび割れ密度と損傷ランクの関係⁸⁾

$$N_{eq} = \sum(P_i/P_0)^m \cdot n_i \quad (\text{ただし } m=1/k) \quad \dots (6)$$

$$T_f = N_f / N_{eq} \quad \dots (7)$$

ここで、

T_f : 疲労寿命年

N_{eq} : 輪荷重頻度分布、自動車通行位置等を考慮して等価に換算した年間の繰り返し回数

N_f : S-N 曲線から求める等価破壊回数

$$N_f = 10^{\{ \log 1.520 - \log (P_0/P_{sx}) \} / 0.07835}$$

P_0 : 任意に設定し基準とする輪荷重(kN)

P_i : 実橋における実交通荷重

n_i : 1年間に作用する輪荷重の総載荷回数

k : (5)式における傾き(-0.07835)

3.2 劣化予測式の課題点

上記劣化予測手法をシステムに導入するにあたっては、いくつかの課題が考えられる。以下にその課題を整理する。

1) 3.1項に示す計算方法は、実橋における床版支間、輪荷重、載荷面積等の条件が実験と同じで、かつ自動車のタイヤが支間中央の一定点上を通った場合に限定される。しかし、実際には床版支間等の条件が異なり、走行位置は固定されていない。さらに、過去の点検結果を反映した現劣化予測手法では、輪荷重、凍害、塩害等を含む複合劣化の結果を反映したものであるのに対し、上記近似式を算出するに当たり行った実験は、供用終了後の橋梁から試験体を切り出し、その後は屋内試験で

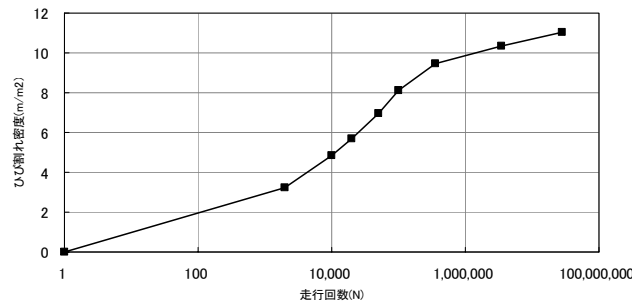


図7 ひび割れ密度－走行回数曲線

行った結果であるため、凍害、塩害等の複合劣化の影響を受けているのは供用期間に限る。

2) 仮に 1)で示した課題を実橋における条件ごとに補正出来たとした場合においても、 P_{sx} , N_{eq} を算出するためには個々の橋梁のパラメータ (式(5)のパラメータや輪荷重頻度分布) を調査する必要がある。特に σ_{ck} , 輪荷重頻度分布は疲労寿命に大きな影響を与えるパラメータであるため、正確なデータが求められるが、データの採取には多くの費用と時間を要する。

3) システムは損傷ランクの遷移確率を基に構築されているため、上記計算方法を導入するには走行回数と損傷ランクの関係付けを行うことを前提としたシステムの大きな改変が必要となり、多くの費用と時間を要する。以上より、3.1項に示す劣化予測手法を RC 床版を有する全橋梁にそのまま適用することは困難であると考えた。

3.3 ひび割れ密度を用いた予測式導入の検討

上記課題点が上げられたため、いくつかのパラメータに標準的な値を仮定し、パラメータを減らした上での導入についての検討を行った。

筆者らによるこれまでの試験結果では、輪荷重の走行回数ごとに RC 床版試験体の下面のひび割れ密度を算出してきており、その関係を示すデータが蓄積されている。また、橋梁定期点検要領 (案) や道路橋の点検および補修・補強設計施工要領 (案)⁸⁾ においても、ひび割れ密度と損傷ランクとの関係が示されている (図6)。これら資料を参考にこの関係を整理することで、輪荷重走行試験機を用いた試験結果として、ひび割れ密度と走行回数の関係に着目した劣化予測が可能と

考え検討した。筆者らがこれまで行ってきた試験結果をもとに算出した、ひび割れ密度と走行回数との関係式を式(8)に示し、グラフを図7に示す。

$$Y=0.02Z^4-0.195Z^3+0.95Z^2-0.75Z \dots (8)$$

ここで、

$$Z=\log N_{130}$$

Y：ひび割れ密度(m/m²)

N₁₃₀：130kNにおける走行回数

N₁₃₀を疲労寿命年に換算するには、個々の橋梁の輪荷重頻度分布を測定する必要があるが、全橋に対して測定することは困難であるため、軸重を100kN、衝撃係数を1.3と考え、標準的な輪荷重として130kNを設定した。また、交通センサより標準的な24時間平均交通量4000台/日、大型車混入率20%を抽出し、鋼道路橋の疲労設計指針⁹⁾を参考に130kN換算の年間交通量を式(9)により4380台/年と算出した。

$$X_{130}=(\text{大型車交通量}/\text{車線数}) \times \gamma_n \times 365 \dots (9)$$

ここで、

X₁₃₀=実橋における標準的130kN換算交通量

大型車交通量：交通量×大型車混入率

交通量：4000台/日

大型車混入率：20%

γ_n:頻度補正係数(0.03)

さらに、N₁₃₀を130kN換算の年間交通量で割り戻すことで疲労寿命年とひび割れ密度の関係を整理したものが式(10)となる。

$$Y=0.02Z^4-0.195Z^3+0.95Z^2-0.75Z \dots (10)$$

ここで、

$$Z=\log N_{130}$$

T₁₃₀：実橋における交通荷重を130kN一定荷重に換算したときの疲労寿命年

$$T_{130}=N_{130}/X_{130}$$

次に、図6を参考に設定したひび割れ密度と損傷ランクの関係、損傷ランクと健全度指数の関係(表5)からひび割れ密度を健全度指数に置換し、疲労寿命年と健全度指数の関係を整理した。さらに、直接システムに導入するため、この曲線式を遷移確率に置き換えた。

表5 ひび割れ密度と健全度指数の対応表

| ひび割れ密度(m/m ²) | 0.0-2.0 | 2.0-3.5 | 3.5-5.0 | 5.0-8.0 | 8.0- |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|------|
| 損傷ランク | OK | IV | III | II | I |
| 健全度指数 | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 |

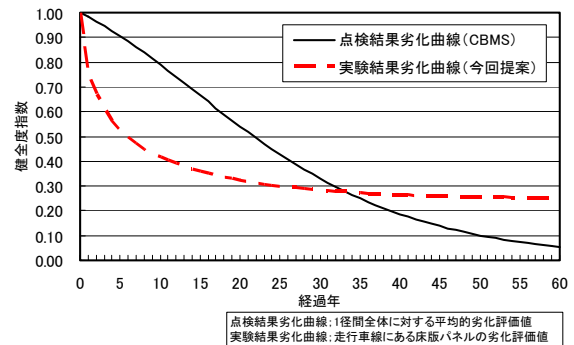


図8 劣化曲線の比較

以上の方法により、条件付のひび割れ密度と疲労寿命年を遷移確率に置き換え算出したRC床版の劣化予測を図8に示す。図8には、点検結果より算出している確率論的劣化曲線も比較できるように合わせて示す。

3.3 考察

効率的維持管理を実施するには、的確な劣化予測が必要不可欠となる。今回、これまで筆者らが行ってきたRC床版の疲労寿命に関する実験的研究成果を、システムに導入することに関する検討を試みた。その結果、課題を明らかにし、予測式のパラメータの一部に仮の標準的値を入力することで、蓄積されたきた知見をシステムに導入可能な段階までに到達することができた。現在システムに導入している確率論的劣化予測手法と比較した結果、提案した劣化曲線は建設初期段階において傾きが大きく急激に健全度指数が低下した後、傾きが小さくなり健全度指数の低下が緩やかになることがわかる。

4. 優先順位付けの検討

4.1 補修橋梁の優先順位付けの必要性

補修事業計画の立案においては「予防保全型」で補修を行うのがLCCの低減につながる事が既往の検討などから明らかである⁶⁾。これまでの対症療法型から予防保全型に移行した場合、健全度を高い水準で推移させることになるため、移行初期に多くの補修計画が立案され、予算を大幅に超えることが想定される。厳しい財政状況を鑑み

| 大項目 | 中項目 | 小項目 | 評価指標 |
|----------|----------|------|-------------------------|
| 路線区間の重要度 | 平常時利用 | 交通容量 | 全車両交通量 車線平均交通量 |
| | 災害時の輸送機能 | 代替性 | 迂回路 |
| | 二次災害波及性 | 桁下種別 | 跨線橋 跨道橋 |
| 事業の効率性 | 他事業との関連性 | | 架け替え計画の有無 緊急対応が必要な損傷 |
| 性能評価 | 安全性 | | BHI |

図9 評価項目の階層図

| 大項目 | No | 小項目 | 評価指標 | 有り | 無し |
|--------|----|-----------|------------|-----------|-----|
| 事業の効率性 | 1 | 他事業との関連性 | 緊急対応が必要な損傷 | 緊急対応グループへ | --- |
| | 2 | 架け替え計画の有無 | 架け替え計画の有無 | 架替橋梁グループへ | --- |

| 大項目 | No | 小項目 | 評価指標 | 評価区分・評点 | | | | | 重み (数値は仮) | |
|-----------|------|------|---------|---------|--------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------|--------|
| | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | 5 |
| 路線・区間の重要度 | 1 | 交通容量 | 全車両交通量 | --- | 1,500 台未満 | 1500 台以上 4,000 台未満 | 4000 台以上 10,000 台未満 | 10,000 台以上 20,000 台以上 | 20,000 台以上 | 0.184 |
| | | | 車線平均交通量 | --- | 2,000 台未満 | 2000 台以上 4,000 台未満 | 4000 台以上 7,000 台未満 | 7,000 台以上 12,000 台以上 | 12,000 台以上 | |
| | 2 | 代替性 | 迂回路 | 有 | --- | --- | --- | --- | 無 | 0.7531 |
| 3 | 桁下種別 | 跨線橋 | 以外 | --- | --- | --- | --- | 該当 | 0.0629 | |
| | | 跨道橋 | 以外 | --- | --- | --- | --- | 該当 | | |

| 大項目 | No | 小項目 | 評価指標 | 1.00 ← | → 0.00 |
|------|----|-----|------|--------|---------------------|
| 性能評価 | 1 | 安全性 | BHI | 後回し | 優先 (そのままの値で並び替え) |

図10 評価区分と評点

ると、優先的に補修をすべきものと後回しにするものを選定する必要が生じる。CBMSでは事業計画機能のシミュレーションにより補修時期を変更することは可能であるが、補修橋梁を選定するには複雑に連鎖している機能性や重要度を比較するため、明確な選定根拠を示すことは容易ではない。そこで、事業計画における補修橋梁の選択支援機能として、機能的な面から客観的に橋梁を評価し、補修の優先度に対する定量化が必要となる。

著者らはこれまでに重要度による補修の検討を行ってきたが¹⁰⁾、本検討では、管理者側の視点に立って評価方法の再設定を行った。

4.2 評価区分の設定

再設定した評価項目の階層図を図9に示す。

1) 全車両交通量

前検討では、評価区分ごとの橋梁数に偏りが生じたことから、正規分布に近くなるような評価区分を設けた。

2) 車線平均交通量

車線当たりの交通量を設定することで、山間部等に多く架設されている片側1車線の橋梁を評価した。

3) 迂回路

| 一対比較値 評価指標 | 「左の指標」の「右の指標」に対する重要度 | | | | | | | | | 一対比較値 評価指標 | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | 1/2 | 1/3 | 1/4 | 1/5 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | 1/9 | |
| 交通容量 | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | 代替性 |
| 交通容量 | | | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | 桁下種別 |
| 代替性 | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | 桁下種別 |

図11 一対比較法による重要度

| | 交通容量 | 代替性 | 桁下種別 | 重み |
|------|------|-----|------|--------|
| 交通容量 | 1 | 1/7 | 5 | 0.184 |
| 代替性 | 7 | 1 | 7 | 0.7531 |
| 桁下種別 | 1/5 | 1/7 | 1 | 0.0629 |

図12 評価指標の重み

緊急輸送の観点を考慮し、山間部や海岸線沿いに架設された橋梁を評価する。

4) 跨線橋および・跨道橋

橋梁二次災害の波及性として跨線橋や跨道橋であるか否かを設定した。

5) 架け替え計画の有無

架け替え計画が既に必要とされる橋梁は後回しとする。

6) 緊急対応が必要な損傷

緊急対応が必要な損傷が生じている橋梁を最優先とした。

以上の評価項目について、事業の効率性については有無の二択、BHIはそのままの数値を評点とし、「路線・区間の重要度」の評価指標は評価区分とそれに対応する評点を設けた(図10)。

4.3 評価指標の重み付け

「路線・区間の重要度」における各評価指標間の相関は低く、これらを同じ土俵で評価するために、重みを設定する必要がある。重みは階層分析法(AHP)を用い、各指標間における一対評価より決定する。一対評価は管理者がその都度判断し再設定することとなるが、本検討では筆者らが一対比較により重みを設定した(図11, 図12)。

4.4 優先順位付けフロー

優先順位付けのフローを図13に示す。

「路線・区間の重要度」の総合評点は、まず交通容量として全車交通量と車線平均交通量、桁下種別として跨線橋と跨道橋のどちらかの指標を選択する。選択された指標に代替性の指標である迂回路を加え、それぞれの評点に重みを乗じたものの和を総合評点とする。例えば、ある橋梁の評点が、全車交通量4、迂回路0、跨線橋5とすると

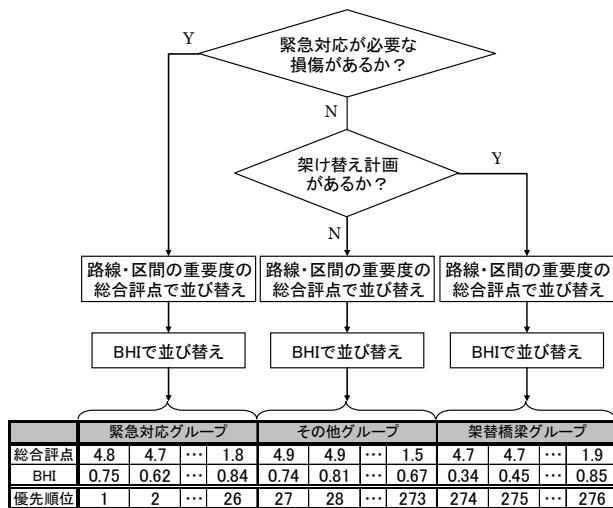


図13 優先順位付けフロー

総合評点は、約 1.05 ($= 4 \times 0.184 + 0 \times 0.7531 + 5 \times 0.0629$) となる。総合評点が同点となった場合は、BHI の低い橋梁を優先とした。

4.5 優先順位付けの分析

優先順位付けのシミュレーションを実橋データを用いて行った。交通容量は車線平均交通量を用い、迂回路の有無等の仮設定し、優先順位付けを行った、その結果、重みの大きい迂回路が無いとされる橋梁が上位を占め、下位にランクされた多くの橋梁は迂回路があり、交通量が少なかった。この結果をみるとある程度の妥当性は感じられるが、最適解であるかどうかは、評価する者によって変わってくると考えられる。また、計画担当者によっても、目的や考え方が異なることから、担当者が一対評価を見直し重み係数を再設定することで様々な考え方に対応できるものと考えられる。

4.6 考察

本検討ではこれまでの検討結果を吟味して、新たな評点を設け評価を行った。CBMS が推奨する事業計画は取り決められたロジックによる最適解であるため、最終的には技術者による判断が必要となるが、本検討は判断に対する一助となると考える。

5. おわりに

プロトタイプシステムの構築がほぼ終了し、維持管理計画を策定するための必要な機能の充実を図るための研究開発を実施した。その結果として、橋梁点検結果を基とした確率論的劣化予測手法の妥当性が確認できた。また、床版を対象とし

た力学的観点からの劣化予測について検討を実施し、システム化への課題を明確化することにより、システムへの導入に対しての初期検討が実施出来た。

一方、維持管理計画を策定する上で、プライオリティの決定は非常に難しいため、今年度整理した優先順位付けについては、客観的評価となっていることから非常に有用なものとなると考えている。

今後は、床版劣化の経験的予測式の評価、確率的劣化予測手法との比較や両立の検討等を進める。また、継続的に管理者の意見を取り入れて改善していくことで支援ツールとしての精度向上を期待している。

参考文献

- 1) 渡邊 一悟,石川 博之,佐藤 京: BMS の構築と運用における課題, 独立行政法人北海道開発土木研究所月報, 技術資料, pp.35-39, 2005
- 2) AASHTO: PONTIS User's anual, Release3. 2, 1997
- 3) 西川和廣: 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No.501/I-29,pp,1-10,1994.10
- 4) 橋梁定期点検要領(案) 国土交通省 道路局 国道防災課 平成 16 年 3 月
- 5) 橋梁点検要領(案) 建設省 土木研究所 昭和 63 年 7 月
- 6) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会 提言 国土交通省 道路局 平成 15 年
- 7) 石井孝男, 谷倉泉, 庄中憲, 國原博司, 松井繁之: 23 年供用した RC 床版の損傷実態・残存疲労寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究 土木学会論文集, No.537/I-35,pp.155~166, 1996.4.
- 8) 道路橋の点検および補修・補強設計施工要領(案) 北海道開発局 道路維持課 P1-117 平成 10 年 10 月
- 9) 鋼道路橋の疲労設計指針 社団法人 日本道路協会 平成 14 年 3 月
- 10) 安達優, 石川博之, 佐藤京, 北海道 BMS における優先順位付けの検討, 平成 18 年度土木学会年次講演会概要集, VI 部門, No.025, PP.49-50, 2006

MANAGEMENT METHOD FOR CIVIL ENGINEERING INFRASTRUCTURES IN COLD, SNOWY REGIONS

Abstract: Since aging of bridges that are under the control of the Hokkaido Regional Development Bureau is steadily progressing, a sharp increase in maintenance and repair work is expected in the near future. It is thus essential to develop effective maintenance and management plans to reduce life cycle costs (LCC). Against such a background, our team has conducted research on a system to support the development of efficient bridge repair plans. The accuracy of deterioration prediction is important for development of maintenance and management plans. Since this system's deterioration prediction utilizes a transition probability matrix, which was statistically calculated from past bridge inspection results, data collection for renewal is extremely time consuming. Meanwhile, our team has also conducted research on residual life prediction of RC floor slabs by means of wheel running tests. A deterioration prediction method, which was obtained as a result of fatigue tests, was thus considered for application to this system in this study.

Key words: maintenance priority, CERI Bridge Management System(CBMS), preventive repair, bridge management plan