

橋梁維持管理システムに用いる RC 床版劣化予測に関する一検討

Investigation on a deterioration prediction of reinforced concrete slabs for bridge management system

安達優^{*1}, 佐藤京^{*1}, 三田村浩^{*1}, 松井繁之^{*2}

Yutaka Adachi, Takashi Satoh, Hiroshi Mitamura, Shigeyuki Matsui

^{*1} 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ (〒062-8602, 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

^{*2} 大阪工業大学 (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地)

In view of the expected increase of existing bridges and the predicted economic situation in the future, the authors have been engaged in the preparation of a bridge management system, which supports the making of efficient management plans with the functions to evaluate the soundness of bridges and predict deterioration. While the deterioration prediction of parts in this system was established based on the accumulated inspection results for the last 15 years and Markov's transition probability formula, further studies are conducted to improve the current deterioration prediction accuracy. Meanwhile, the authors are conducting research on the fatigue durability of RC deck slabs using wheel running tests. This paper presents an overview of the system and a study on incorporating the deterioration prediction method for RC deck slab into the system.

Key words: bridge management system, deterioration prediction, RC deck slab, wheel load running test

1. はじめに

北海道開発局では現在約 4,000 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、約 4,000 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、筆者らは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、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 : CERI Bridge Management System) の構築を行っている。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、今後はさらに劣化予測精度の向上させる必要がある。一方、筆者らは輪荷重走行試験により RC 床版の疲労耐久性、余寿命予測に関する研究を行っている。

本論文では、システムの概要、特に現状の劣化予測手法について述べるとともに、RC 床版の輪荷重走行試験結果に基づく劣化予測手法をシステムに取り込むことに関する一検討について報告するものである。

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¹⁾。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。

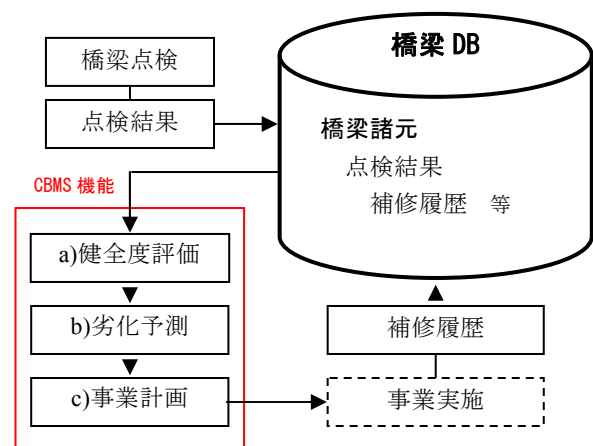


図 1 CBMS の概要

表 1 健全度指数対応表

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

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。また、その維持管理経費の社会経済的置付けの必要性が高まる中で³⁾、橋梁の資産価値としての側面はますます重要なものとなっている。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（前橋梁点検要領（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。

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

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て算出する。この物理的劣化を定量的に示す指標として、旧要領の損傷ランクごとに健全度指数（Wfi）を設けた（表 1）。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、点検時には必ずしも 1 部材に対し損傷ランクが 1 つとは限らず、複数存在している部材がほとんどである。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。

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

ここで、

i：OK（V）～I

Wfi：損傷ランクごとの健全度指数

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

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

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)	
部材名	損傷ランクiの数量割合						(B)	(C)	(D)	(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	0.188	0.187	0.000	0.735	330	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
支承	0.000	0.500	0.500	0.000	0.000	0.625	8	個	1000	8,000	5,000
養護	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
地盤	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

$$BHI = 98,279 / 139,900 = 0.702$$

の資産の比率として用いる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。

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

以上のように橋梁 13 部材に対し、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 に反映されている。

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をすることは難しいため、架け替えや補修等の事業実施時期を決定するには、管理する健全度の下限値を定め、将来の健全度を予測する必要がある。また一方で、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、現在及び将来の健全度を推定する必要もある。

構造物の劣化予測に関しては、既に各研究者により多くの検討が行われている。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、塗装の膜厚測定、板厚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個別の対応は可能となっている。

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試験等が必要となる。しかしながら、現在の社会情勢を考慮した場合、このような多くの時間と費用のかかる調査をすべての橋

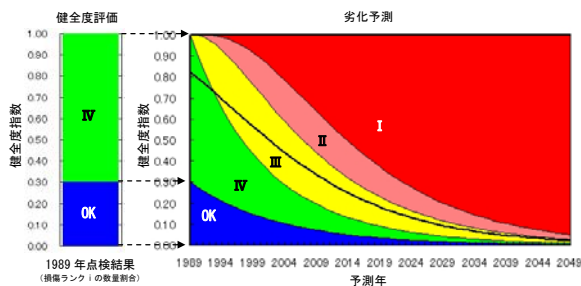


図2 健全度評価結果と劣化予測への移行

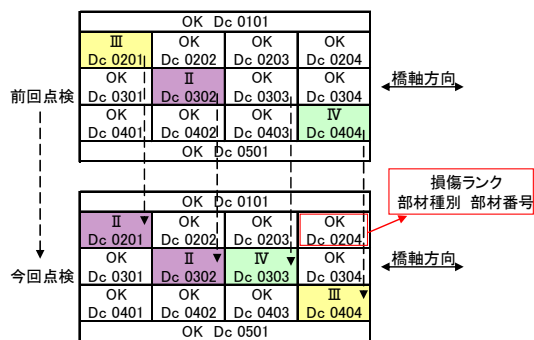


図3 床版下面の点検結果による劣化状況イメージ

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多く机上の予測も困難なことがある。そのため BMS へ適用する場合は、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

今ある事象をもとに、将来的な状態を予測する手法としてマルコフ過程による予測がある。このマルコフ過程に着目した理由は、図2に示すように2. 1項で示した健全度評価結果をそのまま劣化推移の初期値として利用できるためである。例えば図2中の劣化予測結果（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 $0.825 (=0.75 \times 0.7 + 1.00 \times 0.3)$ であったものが年度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、マルコフの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。

しかし、損傷原因に対しては明確な評価は行われておらず、実際はいくつかの劣化要因により損傷が発生して

表3 床版の遷移確率年（N）

損傷ランク	OK	IV	III	II	I
確率年	9.730	5.470	6.060	1.000	1.000

表4 床版の遷移確率（P）

年度	n	n+1	n+2	n+3	n+4
	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

いる複合劣化の場合は、目視を基本とする点検結果のみで損傷要因別の劣化式を選定するのは困難といえる。損傷の評価結果を基にその後の劣化を予測する場合、劣化要因に着目した予測式や標準的な劣化曲線では、損傷状態を式上のどの点に位置するかを関連づける必要がある。

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。

(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、前後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。図3は床版下面のパネル図を用いて床版下面の点検箇所を示したもので、前回点検結果と今回点検結果の間でランクの推移を評価する部材を点検要領に記載されているものである。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することとした。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 $N(IV) = 5.470$ 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 $N(IV)$ 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、計算上は無限大となるが、

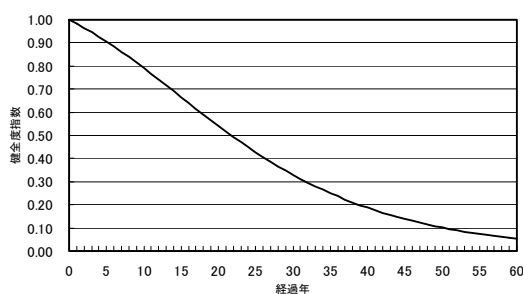


図4 コンクリート床版の劣化予測結果

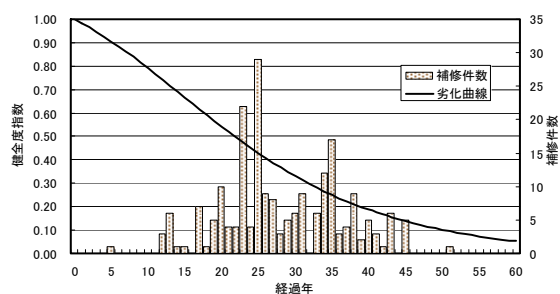


図5 コンクリート床版の補修実績との比較

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的なものが多いことから、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における対象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の6割を占めることから、この劣化曲線の妥当性を示す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)

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

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り返し載荷を、任意に設定し基準とする輪荷重 P_0 に変換した等価繰り返し回数は式(6)で表される。また、式(6)の等価繰り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。

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

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

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

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
0		1.0 m 以上 1 方向のみ	0.06 mm 以下 (ヘアークラック)
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
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
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
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

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

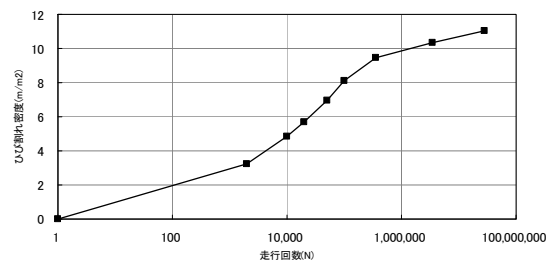


図7 ひび割れ密度－走行回数曲線

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

上記課題点が挙げられたため、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。なお、実測では、裸眼で行い、目と床版下面の距離はほぼ 20cm であり、0.04mm 以上のひび割れ幅を対象としている。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。

$$Y=0.02(\log N_{130})^4-0.195(\log N_{130})^3+0.95(\log N_{130})^2-0.75\log N_{130} \cdots \cdots (8)$$

ここで、
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、交通センサスより標準的な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。

$$X_{130}=(\text{大型車交通量}/\text{車線数})\times\gamma_n\times365\cdots\cdots(9)$$

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。

$$Y=0.02(\log T_{130})^4-0.195(\log T_{130})^3+0.95(\log T_{130})^2-0.75\log T_{130} \cdots \cdots (10)$$

ここで、
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
T₁₃₀=N₁₃₀/X₁₃₀

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(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。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。比較した結果、現状の劣化曲線に対し、今回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。

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

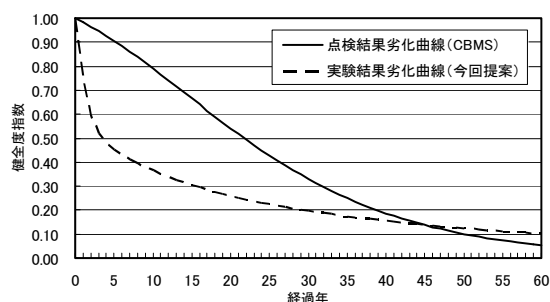


図8 劣化曲線の比較

4. おわりに

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、課題が浮き彫りとなったが、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。

今後は、橋梁固有の条件(桁支間長、輪荷重載荷位置等)に応じた予測式の補正手法の検討、橋梁固有データの効率的採取手法や、様々な劣化予測手法の導入をいらいシステムの柔軟化等の検討を進める。

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 Manual, Release 3.2, 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, 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.