

## 寒冷地環境における RC 床版の劣化予測に関する研究

Study on deterioration prediction of RC slabs in a cold region

北見工業大学大学院	○学生員	鈴木広大 (Suzuki Kouta)
北見工業大学	正員	三上修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学	フェロー	大島俊之 (Toshiyuki Oshima)
北見工業大学	正員	山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
㈱ドーコン	正員	佐藤誠 (Makoto Sato)
㈱北海道道路管理技術センター	正員	竹田俊明 (Toshiaki Takeda)

## 1. まえがき

我が国で供用されている橋梁の多くは、架設当初よりも厳しい環境条件にさらされており、損傷が増大する傾向にある。そのため、限られた予算を有効に活用し、橋梁を包括的に橋梁維持管理するシステム BMS (Bridge Management System) の開発<sup>1)</sup>が急務となっている。著者らが開発を進めている BMS は、大きく分けて、橋梁点検、健全度評価、劣化予測<sup>2)</sup>、事業シミュレーションの4つの部門から構成されているが、未だ実用化には至っておらず、BMS の実用化へ向けて劣化予測部門における予測精度の向上が非常に大きなファクターとなっている。

以上のような背景から、本研究では積雪寒冷地である北海道における実橋床版の劣化予測手法に関する検討を行っており、BMS 実用化へ向けた劣化予測精度向上を主な目的としている。北海道でこれまで蓄積されてきた点検データを基に、床版劣化へ影響を及ぼすと思われる各環境条件の影響を明確にするとともに、その影響を劣化予測へ考慮する手法を検討したので報告する。

## 2. 寒冷地における道路橋床版の劣化

RC 床版の劣化に関しては、松井らによる研究<sup>3)</sup>が著名であり、既往の研究・実験により床版の疲労劣化機構が明らかにされ、疲労予測式(以下、松井式)が提案されている。しかし、この予測式は交通荷重の繰返し載荷による疲労劣化を予測したものであり、寒冷地である北海道特有の劣化影響因子を反映した予測にはなっていない。そのため、寒冷地で供用されている実橋床版の劣化予測を行うためには、床版劣化に影響を及ぼす因子を明確にするとともに、その影響度を求めることが必要である。

そこで、本論文ではこれまで BMS に蓄積されてきた実橋床版の点検入力結果を基にして、劣化に影響すると思われる環境条件を詳細に分析し、その影響度を評価している。また、そこから得られた影響度を松井式に組み込むことで、北海道特有の環境条件を考慮した床版劣化の予測を行っている。

## 3. 点検データによる劣化影響因子の分析

寒冷地における劣化影響因子の影響を明確にするために、北海道でこれまで蓄積されてきた点検データにより

以下の検討を行った。

## 3.1 分析概要

北海道における橋梁点検業務は、旧建設省の橋梁点検要領<sup>4)</sup>に基づいて実施されてきた。その点検結果は点検ランクとして表され、健全な方から OK, IV, III, II, I の5段階で表記されている。本章では BMS に蓄積されてきた点検データから部材ごとのデータを抽出し、降水量、凍結防止剤散布などの影響を検討した。

## 3.2 降雨の影響

床版への水分供給は、凍結融解作用を促進させるだけでなく、疲労現象の促進にもつながる重要な因子である。実橋への水分供給源は主に降雨によるものと考えられるため、各地域の年間降水量を気象観測データ<sup>5)</sup>より取得し BMS のデータベースに組み込んだ。そのデータから、降水量と床版劣化の関係を図-1 に示す。同図は縦軸に、床版ひび割れに関する点検データを OK 部材、つまり健全であると判断された部材も含めて橋梁毎に平均した、ひび割れランクをとっている。横軸に対象橋梁架設地域の年間降水量をとっている。降水量が多い一部の地域ではランクが若干低い傾向にはなっているものの、全体的にはほぼ横ばいであり、劣化への影響度が明確には表れているとは言い難い。そのため、降水量だけではなく、縦断勾配や排水溝、床版防水工の有無といった水分供給に関連した項目を加えた検討が必要であると考えられる。

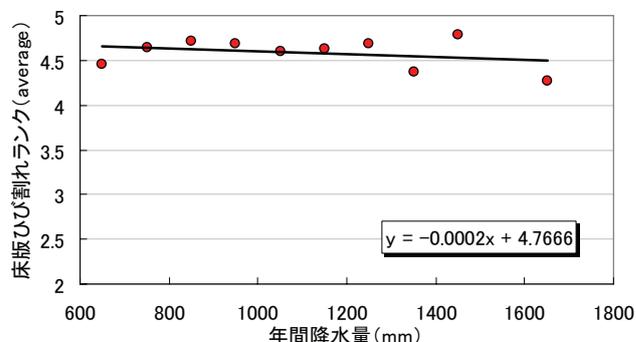


図-1 床版ひび割れランクと年間降水量の関係

## 3.3 凍結防止剤散布による影響

北海道のような寒冷地では、冬期路面管理に凍結防止

剤を散布しているが、近年この凍結防止剤から供給される塩化物によるコンクリート部材の劣化が懸念されている<sup>6)</sup>。したがって、効率的な維持管理を行っていくためには、凍結防止剤によって供給される塩分の影響度判定は特に重要な項目であると考えられる。

本論文では、この凍結防止剤散布の影響を直接的に受けると考えられる地覆コンクリート部に着目し、その影響度を明確にするとともに、床版部材への影響度に関しても検討を行い、凍結防止剤の影響を床版劣化に結び付けている。

**(1)凍結防止剤散布量（散布実績）**

凍結防止剤散布量は、劣化への影響を検討する上で、個々の橋梁に直接散布された量を把握することが望ましいが、散布に関しては路線毎に行われるため、1橋当たりの厳密な散布量を算出することは困難である。そこで、本論文では北海道開発局の開発建設部毎の散布実績データを基に、凍結防止剤散布比率を算出した。算出結果を図-2に示す。この散布比率とは、散布実績が最も多かったF開建とH開建の散布量を基準として比率で表したものである。本論文では、この散布比率を基にして、凍結防止剤による劣化への影響を検討するものとした。

**(2)地覆部における凍結防止剤散布の影響**

橋梁点検データベースより、地覆部のデータを抽出し、次の検討を行った。凍結防止剤散布による劣化への影響として塩害作用が考えられるため、剥離・鉄筋露出に関するデータを選別し、凍結防止剤散布比率との関係を図-3に示す。同図は横軸に前述の散布比率、縦軸に剥離・鉄筋露出ランクを健全な部材を含め橋梁毎に平均化したものとしている。同図を見ると、散布比率が大きくなるほど、ランクが低下する右下がりの傾向にある。これは、散布の影響を最も強く受けるとされる地覆部のコンクリートの劣化を、凍結防止剤が促進していることを表すものである。

**(3)床版への凍結防止剤散布の影響**

前項で凍結防止剤散布による地覆への影響を示したが、散布の影響が床版にも同様に表れるとは考えにくい。路面に散布された凍結防止剤が床版へ付着するには、水の流れを伴った薬剤の移動により起きるものと考えられる。そこで、床版部材の点検データより伸縮装置付近の桁端部に位置するパネルのみを抽出し、地覆部と同様の検討を行った。床版端部の損傷ランクと凍結防止剤散布比率の関係を図-4に示す。同図は横軸に凍結防止剤散布量、縦軸に伸縮装置に近い桁端部に位置するパネルの床版剥離ランクの平均値をとっており、散布量が多くなるほど、ランクが低下、つまり損傷が進行する傾向が得られた。これにより、凍結防止剤の散布が床版劣化へ影響することがわかる。

**4. 床版の疲労劣化予測手法<sup>2),3)</sup>**

**4.1 疲労劣化予測式**

RC床版の疲労劣化予測手法として著者らは松井式に基づき、BMSへ用いるための手法を提案している<sup>2)</sup>。本論文では、この手法に加えて北海道における交通荷重の実測データを用いて予測の補正を行っている。以下に予

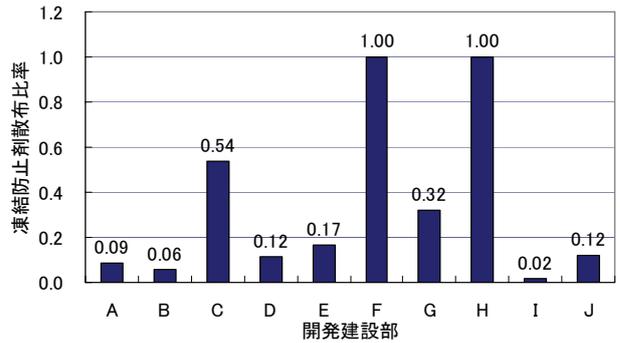


図-2 開発建設部毎の凍結防止剤散布比率

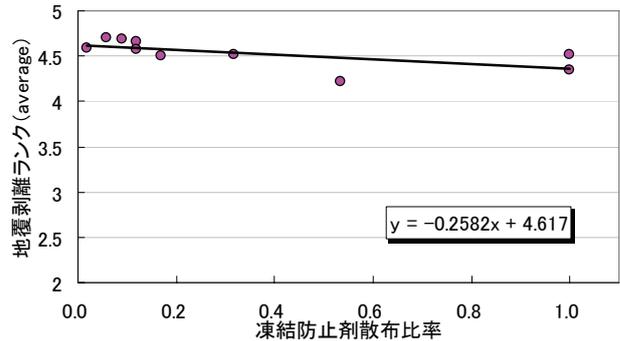


図-3 地覆剥離ランクと凍結防止剤散布比率の関係

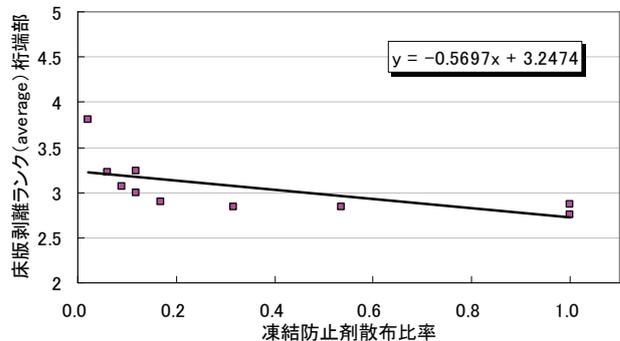


図-4 床版剥離ランク（桁端部）と散布比率の関係

測手法の詳細を記述する。

$$T_f = N_f / N_{eq} \tag{1}$$

$$N_{eq} = \sum (P_i/P_0)^m \cdot n_i \quad (\text{ただし } m=1/k) \tag{2}$$

ここに、

$T_f$ : 疲労寿命

$N_{eq}$ : 輪荷重頻度分布、車両通行位置等を考慮して等価に換算した年間の繰返し回数

$N_f$ : S-N 曲線から求める等価破壊回数

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

$P_0$ : 基本輪荷重

$P_i$ : 作用荷重（ある確率密度関数  $f(p)$  に従う）

$n_i$ : 1年間に作用する輪荷重の総載荷回数

$P_{sx}$ : はりの押し抜きせん断耐荷力

### 4.2 モデル橋梁による補正

前項の予測手法は実験供試体による試験結果から導出された計算式であるため、実橋床版に適用するために多くの補正を必要とする。しかし、その補正を行うには実橋床版の詳細な諸元が必要となるために、道内に架設された全ての橋梁に関して補正を行うことは極めて困難である。そのため、実橋から測定できる項目は測定を行い、測定が困難な項目は推定値を用いることが有効であると考えられる。そこで、文献<sup>7)</sup>のモデル橋梁の諸元(表-1)を参考値として予測に用いる。

表-1 予測に用いた床版諸元

床版厚	200mm	
床版支間	3000mm	
配筋	主鉄筋	D19-125mm 間隔
	配力筋	D16-200mm 間隔
適用示方書	昭和47年道路橋示方書	

### 4.3 輪荷重の影響

輪荷重に関する実橋上の交通荷重は、重量交通地域である東海地域等においては、測定報告<sup>8)</sup>があるが、北海道における交通荷重測定結果報告は少ない。しかし、予測を行う上で輪荷重の影響は無視できないため、本論文では札幌市国道12号線に架設されている東橋の交通荷重測定結果報告<sup>9)</sup>を参考値として用いる。

### 4.4 降水量の影響

疲労問題においても水の影響は甚大であり、その影響は松井らによって報告されている<sup>10)</sup>。松井らは水の影響の検証として、輪荷重走行試験を水張り状態のRC床版供試体で行った結果、疲労寿命が約1/40に低下したとされている<sup>10)</sup>。本論文では、この事例を参考に実橋における水の供給源である降雨を集計して、次のように水の影響を考慮するものとした。

松井らの試験では供試体床版上に常時1~2mmの水を張っている状態で輪荷重走行試験を行っていた。そこで、この常時1~2mmの水張り状態を実橋環境においても同様の条件となる降雨条件を仮定する。365日毎時間、1mmの降雨があった場合を松井らの水張り状態試験と同等の状況であるとする。この仮定に基づき、疲労における降水量の影響として考慮している。

## 5. 劣化予測評価

### 5.1 疲労予測結果とひび割れランクの関係

4章で述べた劣化予測の対象となる指標は、等価に換算した繰返し回数であり、破壊回数と累積走行回数の比で劣化度を評価している。一方、北海道でこれまで蓄積されてきた点検データは、橋梁点検要領(案)<sup>4)</sup>に基づき、床版のひび割れをランクで評価し劣化度を判定している。そのため両者を比較するためには、劣化度の判定基準を同一にする必要がある。ここでは両者の判定基準を同一にして比較するために、ひび割れランクと走行比の関係を図-5のように仮定した。同図の縦軸はひび割れ密度比、横軸は走行比をとり、両者の関係を示す松井らの実験値<sup>11)</sup>に近似曲線をひいたものである。図中の破

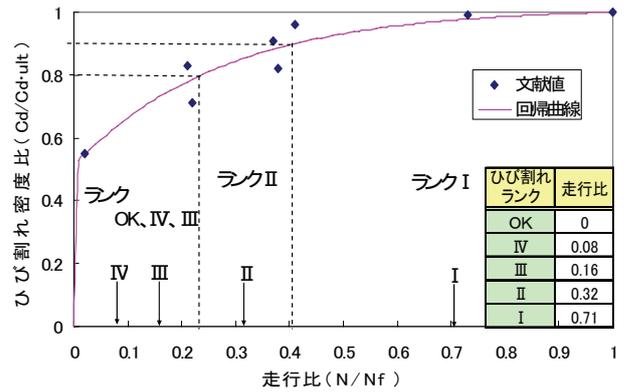


図-5 ひび割れ密度比と走行比および点検ランクの関係

表-2 点検要領<sup>4)</sup>によるランクの規定(床版ひび割れ)

判定	ひび割れパターン	ひび割れ幅	最小間隔	ひび割れ密度
IV	1方向	0.2mm未満	-	4m/m <sup>2</sup> 程度
IV	1方向	0.2mm~0.3mm	50cm以上	
IV	2方向	0.2mm未満	50cm以上	
IV	2方向	0.2mm~0.3mm	50cm未満	
III	1方向	0.2mm~0.3mm	50cm未満	4~8m/m <sup>2</sup>
III	1方向	0.3mm以上	-	
III	2方向	0.2mm未満	50cm未満	
III	2方向	0.2mm~0.3mm	50cm以上	
II	2方向	0.2mm~0.3mm	50cm未満	8m/m <sup>2</sup> 程度
II	2方向	0.3mm以上	-	

線は限界ひび割れ密度を10m/m<sup>2</sup>と仮定することで、橋梁点検要領(案)におけるひび割れ密度の目安(表-2)からひび割れランクの領域を区分したものであり、領域を等分割して図中右表のように走行比とひび割れランクの関係を仮定している。

### 5.2 疲労予測結果とひび割れランクの比較<sup>2),11)</sup>

4章の予測結果と、北海道でこれまで蓄積されてきた点検データの結果を5.1節の比較手法により比較することで、予測手法の評価を行う。この比較に用いたランクは、疲労との比較という意味合いから床版ひび割れについての損傷ランクのみを用いており、前述したように健全な部材も含めて橋梁毎に平均化したものを用いている。

図-6に予測結果と点検データの比較結果の一例として、T橋における予測結果を示す。同図の縦軸は疲労劣化度を示す累積NeqとNfの比をとり、横軸に供用開始からの累積大型車交通量をとったグラフである。この縦軸の劣化度が1に達した場合に、床版が疲労破壊することを表

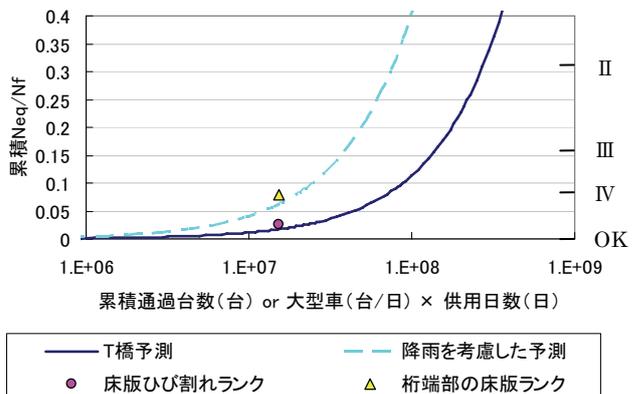


図-6 T橋予測と点検データの比較結果

している。図中実線が通常の予測結果を示し、破線が降雨による影響を考慮した予測結果である。また、点検データに関しては対象橋梁 T 橋の床版ひび割れ点検結果を既存データベースから抽出し、右側の縦軸であるひび割れランク上にプロットした。このランクは床版ひび割れの損傷ランクを健全なパネルも含めて、橋梁全体で平均化したものである。

同図に示した結果から、T 橋のひび割れ損傷は本予測結果とほぼ近い位置にプロットされており、予測自体の妥当性を示した結果であると考えられる。しかし、降雨による影響を考慮した予測結果は、実橋の損傷よりも危険側（図中左側）に推移している。これは、降雨による水分供給が最も集中する桁端部に位置するパネルのような最も厳しい予測評価であることが要因として考えられる。つまり、図中丸印のプロットは橋梁全体のランクを平均化して用いているために、最も損傷の進行しているパネルよりも、ランクが高い（健全な）方に引っ張られたものと考えられる。その裏づけとして、T 橋の端部に位置するパネルのランク（図中三角印）は、降雨による影響を考慮した予測結果と概ね一致している。

以上の結果から、RC 床版において予測を行う場合、パネル単位での予測を行い、対象パネルの位置によって予測結果を補正する必要があるものとする。

## 6. 結論

本研究では、道路橋 RC 床版を対象として、蓄積された点検データに基づき寒冷地特有の環境条件の影響を明確にするとともに、松井らの研究成果を応用した床版の劣化予測手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 実橋環境での降水量による劣化への影響を、点検データを用いて検討を行ったが、明確な傾向は得られなかった。そのため、縦断勾配や床版防水工の有無といった水分供給に関連する項目を用いてさらなる検討が必要である。
- (2) 凍結防止剤散布によるコンクリート部材への影響を、開発建設部ごとの散布実績に基づいた散布比率と、蓄積された地覆部の点検結果、床版の桁端部に位置するパネルの点検結果を基に、関連付けることができた。
- (3) 寒冷地の環境条件を考慮した予測手法の一例として、松井らの報告に基づき、降雨の影響を考慮した劣化予測を行った結果、点検データと予測結果は近い位置に推移しており、予測自体の妥当性を示すものであった。また、RC 床版の予測を行う場合、パネルが位置する場所に応じて予測に劣化影響因子の影響を補正值として組み込む必要があるものとする。

最後に今後の課題として、寒冷地特有の環境条件である凍結防止剤散布や凍結融解作用といった因子による床

版劣化への影響を明確に反映させた予測モデルの確立が必要である。また、疲労予測式において重要な意味を持つ実測データ（交通荷重や床版圧縮強度）をデータベースに蓄積し、さらに予測結果を比較、検討していく必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、株式会社フジエンジニアリング 松本正信氏、大阪工業大学松井繁之教授に大変有益なご助言を賜りました。ここにお名前を掲載させていただき、感謝の意を表します。

本研究は平成 18 年度日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号 17560418 代表者 大島俊之）の補助を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 大島俊之、三上修一、丹波郁恵、佐々木聡、池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析、土木学会論文集, No.703/ I -59, pp.53-65, 2002.
- 2) 佐藤誠、大島俊之、三上修一、樋口匡：点検データに基づく床版劣化の推定と BMS への応用、構造工学論文集, Vol.51A, pp1147-1155, 2005.
- 3) 松井繁之、小島敬克、島田功、清水誠一、福井隆晴、福田収、前田昌俊：RC 床版の耐荷力と耐久性、土木学会関西支部昭和 60 年度講習会テキスト「既存橋梁の耐荷力と耐久性」(委員長 前田幸雄), pp.25-116, 1985.7
- 4) 建設省土木研究所：橋梁点検要領（案）、土木研究所資料、第 2651 号、1988.
- 5) 気象庁：電子閲覧室、<http://www.data.kishou.go.jp/>
- 6) 新銀武、岩崎正二、出戸秀明、宮本裕：積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した床版余寿命診断に関する研究、鋼構造年次論文報告集, Vol.13, pp347-354, 2005.
- 7) 土木学会コンクリート委員会：2001 年度制定コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会、2001.
- 8) 石井孝男、篠原修二：東名高速道路の交通荷重測定と荷重特性について、土木学会論文集 No.453/VI-17, pp.163-170, 1992.
- 9) 三田村浩、安達優、石川博之：橋梁床版を用いた車両軸重測定と測定データから推定した床版の残存寿命、寒地土木研究所月報, No.637,2006.6.
- 10) 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.
- 11) 松井繁之、前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文 No.374/ I -6, pp.419-426, 1986.