

BMS に用いる RC 床版の疲労劣化予測手法について

Study on fatigue deterioration prediction technique of the reinforced concrete slab for BMS(Bridge Management System)

北見工業大学大学院 ○学生員 樋口匡 (Masashi Higuchi) 北見工業大学 フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)
北見工業大学 正員 三上修一 (Shuichi Mikami) 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 竹田俊明 (Toshiaki Takeda)

1. はじめに

現在、我が国の橋梁をとりまく状況は、橋梁自身の老朽化、交通量の増加や車両の大型化などにより、設計当初の予想より過酷な条件で長期間使用されており、著しい損傷を持つ橋梁が年々増加する傾向にある。特に鉄筋コンクリート床版においては、コンクリートが部分的に抜け落ちるといった事例が多く報告されてきた。

この様な背景から、大島らは限られた予算を最大限に活かすべく、包括的な橋梁維持管理システム(BMS)の開発を行ってきた¹⁾。本システムは橋梁点検、健全度評価、劣化予測、経済分析からなり、現在では点検および健全度評価のシステムが確立されている。それに対して劣化予測の分野は、本 BMS に限らずシステムの確立・実用化が成されていないのが現状であり、劣化予測手法の確立が望まれている。また、本システムは多くの橋梁を対象とし、補修・補強計画をサポートするものであるため、劣化予測においてもその対象は多数でなければならない。

以上の観点から、本研究はこれまでに開発された BMS の発展を目的とし、橋梁の主要部材である RC 床版における点検データの傾向分析と劣化予測手法の検討を行ったものである。

2. RC 床版の劣化傾向

2.1 我が国における橋梁点検業務

我が国における道路橋の橋梁点検業務は、1988 年(昭和 63 年)に旧建設省土木研究所が公表した橋梁点検要領(案)²⁾に基づいて実施されてきた。また、その結果はランクで表され、健全な方から OK, IV, III, II, I, とされた。本章では北海道において点検された実橋のデータを用いてその劣化傾向を考察した。

2.2 RC 床版の劣化指標とデータの分類

(1) RC 床版の劣化指標

前述の点検項目のうち、床版に関するものは剥離、ひび割れ、その他、の 3 項目である²⁾。一方、RC 床版の劣化程度とひび割れの進行には定量的な関係があり、ひび割れ密度によって RC 床版の劣化度が概ね把握できることが知られている³⁾。これより、本節では RC 床版の点検結果のうち、ひび割れによるものを劣

化指標とし、その傾向について述べる。

(2) 点検データの分類

RC 床版における劣化の進行程度は、対象となる橋梁の設計条件および環境条件に大きく起因すると考えられる。従って、本節では以下のような条件を設け、点検データを分類した。

①大型車交通量による分類

大型車の交通は RC 床版が疲労破壊を起こす直接的な原因となり、劣化の進行程度に与える影響が非常に大きいと予想される。よって、点検データを大型車の走行台数が 0~2000, 2000~4000, 4000~台/日の 3 段階に分類した。なお、交通量のデータは H8 年全国道路交通情勢調査⁴⁾を用いた。

②供用開始年による分類

橋梁をとりまく様々な条件や環境は、時代と共に変化している。その変化が劣化の進行程度に及ぼす影響を考え、点検データを供用開始年により 1960 年以前、1961~1980 年、1981 年以降の 3 段階に分類した。

③適用示方書による分類

RC 床版は厚さなどの形状や、使用する鉄筋、コンクリート等により、自身の性能および耐荷力が変化する。これらが劣化の進行程度に与える影響として、点検データを適用示方書により分類した。分類は示方書の変遷を意識し、最小床版厚や活荷重の変更があった昭和 42(1967)年以前、昭和 43~48(1968~1973)年、昭和 53(1978)年以降、とした。

2.3 点検データの分類結果と考察

前述の条件で点検データを分類した結果を図-1, 図-2, 図-3, に示す。各グラフは縦軸に点検ランク、横軸に供用年をとっている。

図-1 では各プロットが全体に分布しており、そのばらつきが大きい。また、交通量の少ない大型車台数 2000 台/日以下においても、比較的早い段階でのランク低下がみられる。この原因として塩害、凍害、アル骨、中性化等による疲労以外の要因で、ひび割れが促進された可能性が考えられる。結果的に、条件設定が大型車交通量だけではばらつきが大きく、明瞭な傾向は得られなかった。

逆に、図-2 では供用開始年が現在に近づくにつれて、

早い段階からランクが低下する傾向が得られた。さらに、図-3でも同様の傾向が得られた。本来、道路橋示方書の改訂と共に床版厚や設計荷重が変更されているため、近年になるにしたがって、RC床版の耐荷力は向上しているはずである。しかしながら、本結果は適用示方書の年代に反する劣化傾向を示している。一般に、塩害や凍害を引き起こす環境条件は、年代により変化せず、交通量は時代と共に大きく変化すると考えられる事から図-2、図-3、における劣化傾向は交通量の増大に伴う、RC床版の疲労現象によるものと推察される。

以上から、本研究ではRC床版の劣化のうち、疲労によるものに着目して劣化予測手法の検討を行った。

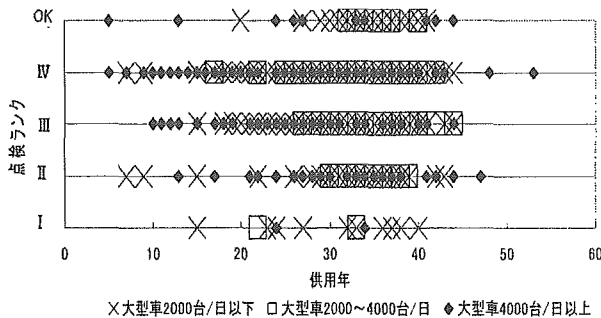


図-1 大型車交通量による点検データの分類結果

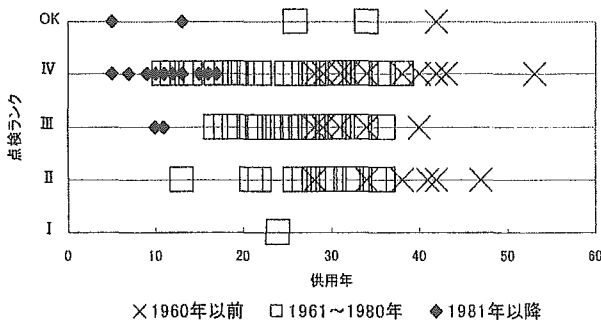


図-2 供用開始年による点検データの分類結果

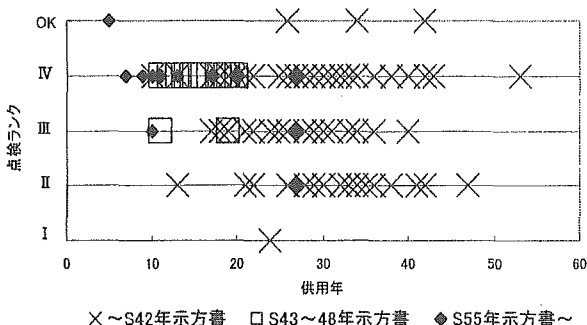


図-3 適用示方書による点検データの分類結果

3. RC床版の疲労劣化予測手法

走行荷重を受ける道路橋RC床版の疲労は、松井らによってその破壊機構、疲労強度が明らかにされている⁵⁾、⁶⁾。さらに、RC床版の疲労被害には、マイナー則が適用できることが知られている。従って、本予測では輪荷重走行試験より得られたS-N曲線にマイナ

一則を適用し、疲労寿命を推定する。

3.1 マイナー則の適用法と予測式

(1) 用いるS-N曲線の仮定

輪荷重走行試験より得られた(3.1)式を適用する⁶⁾。

$$\log(P_0/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (3.1)$$

ここに、

P_{sx} : 有効幅Bのはりの押し抜きせん断耐荷力(tf)

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

B: はりの有効幅(cm)

$$B = b + 2d_d$$

X_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ(cm)

C_m : 主鉄筋の有効高さ(cm)

τ_{max} : コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm²)

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

σ_{max} : コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm²)

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

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

b: 載荷版の配力鉄筋方向の辺長(cm)

d_d : 配力鉄筋の有効高さ(cm)

(2) 疲労予測基本式およびマイナー則の適用

実橋において1年間に、 P_1, P_2, \dots, P_n という荷重がそれぞれ 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載荷繰返しを、基本となる荷重 P_0 に変換した等価繰返し回数は、(3.2)式で表される。また、(3.2)式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、疲労寿命 T 年となる。すなわち(3.3)式が疲労予測の基本式となる。

$$N_{eq} = \sum (P_i/P_0)^m \cdot n_i \quad (\text{ただし } m=1/k) \quad (3.2)$$

$$T = N_f/N_{eq} \quad (3.3)$$

ここに、

T: 疲労寿命

N_{eq} : 等価繰返し回数

N_f : S-N曲線から求める等価破壊回数

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

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

3.2 実橋への適用方法

(1) 実験と実橋の違いによる補正

前述の計算方法は、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、実際には床版支間が異なり、通行位置は固定されておらず任意である。よって、実橋の疲労劣化予測を行うにはこれらの影響を考慮して補正を行わなければならない。補正を行ったものを式(3.4)に示す⁶⁾。

$$N_{eq} = \alpha \cdot m \cdot (1+i)^m \cdot (Q_{max}/Q_0)^m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot N_i \quad (3.4)$$

ここに、

α : 載荷面積のちがいによる補正係数

i: 衝撃係数

m: log-log表示されたS-N曲線における傾き絶対値の逆数

Q_{max} : 通常走行時の平均輪荷重通行位置に基本輪荷

重を作用させた時主鉄筋断面に作用するせん断力
 Q_0 : 床版支間中央に1つの基本輪荷重を作用させた
 とき主鉄筋断面に作用する垂直せん断力
 C_1 : 通行位置による補正係数
 C_2 : 輪荷重頻度分布による補正

(2) 実橋への適用

予測式を実橋に適用するに当たり、(3.4)式のような補正が考えられる。しかし、橋梁毎に必要なパラメータを計測する事は非常に困難である。そこで本章では以下に示す様に疲労劣化予測を行った。なお、対象となる橋梁は、交通量が多い道内A号線のa橋であり、日平均交通量32178台、大型車混入率21.3%となっている。

①橋梁諸元

予測には床版の設計条件や、形状等による諸数値が必要になる。ここでは、2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]⁷⁾によるRC床版の例を参考とした。

②衝撃の影響

衝撃係数は示方書で $20/(50+L)$ で与えられており、Lは支間長である。この係数は実橋梁の支間長に対して大きな変化をしないので、ここでは0.38とした。

③輪荷重の影響

輪荷重に関する確率密度関数は、全国平均の全車種平均軸重データ(3.5)式⁸⁾を用いた。また、全車種平均のデータだけを用いると、大型車混入率の影響が考慮されない可能性が出てくることから、並行して東名高速道路で実測された大型車種の軸重データを正規分布(6.95,3.88)⁹⁾と仮定し用いた。なお、実際に計算で用いるのは輪荷重となるため、軸重および確率分布を2で除して輪荷重ならびにそれに関する確率分布とした。
 $\log\{100F(p)\} = -0.2732 - 0.12135p - 0.001767p^2$ (3.5)

F(p): 軸重の確率分布

p: 軸重(ton)

④交通量の影響

北海道の国道A号線における交通量の経年変化⁹⁾を図-4に示す。同図は縦軸に日平均交通量、横軸に西暦をとっており、A号線における各地区のデータをプロットしている。

a橋におけるH8年度の交通量および大型車混入率は既知であり、所在地がee地区に属する事から、両者の大小関係は一定で、同じ経年変化をすると仮定した。また、大型車交通量に関しても同様の方法をとった。

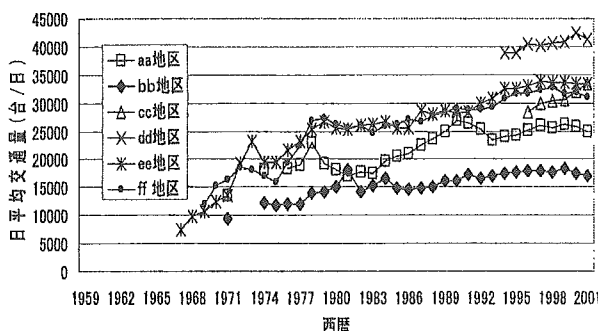


図-4 A号線における交通量の経年変化

3.3 a橋の予測結果

a橋の予測結果を図-5に示す。同図は縦軸に累積 N_{eq} と N_f の比、横軸に西暦をとっている。つまり縦軸が1になった時に、a橋の床版が疲労破壊する事を示す。また、同図には大型車台数のみを考慮したものと、全車種の平均軸重を用いたものがプロットしてある。結果として、a橋が供用開始された1955年から10年程度は劣化が進まず、その後交通量の増大と共に劣化が加速する傾向が得られた。a橋の詳細な橋梁緒元が得られず文献⁷⁾の値を用いた為、多少の誤差が考えられるが、近年の点検ランクが早期に低下する傾向を反映した結果といえる。

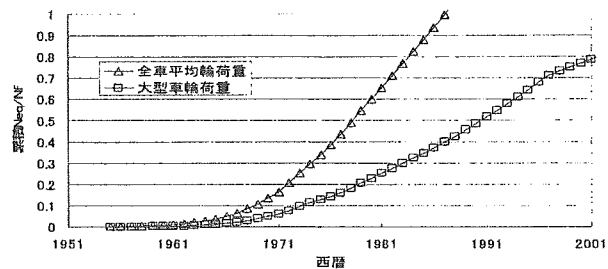


図-5 a橋の予測結果

4. 予測結果の検証

劣化予測の対象となる指標は、等価に換算した繰り返し回数であり、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、前出の点検ランクはひび割れを対象に劣化度を判定している。両者を比べるためには、劣化度の判断基準を同一にする必要がある。

従って、本章では予測結果と点検データの比較方法を検討し、両者を比較検討する事で予測結果の検証を行った。

4.1 点検要領²⁾による判定基準

点検ランクの判定基準^{2),10)}を表-1に示す。各ランクはひび割れパターン、ひび割れ幅、ひび割れの最小間隔、の組み合わせで判定され、各ランクにおけるひび割れ密度の目安が示されている。また、表中に点検ランクOKとIが存在しないが、OKは各項目に該当せず健全な状態、Iは交通の安全確保の支障となる恐れがある場合で、補修工法の選定を行う段階を示す。

表-1 点検ランクの判定基準

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 ² 程度
IV	1方向	0.2mm~0.3mm	50cm以上	
IV	2方向	0.2mm未満	50cm以上	4~8m/m ²
III	1方向	0.2mm~0.3mm	50cm未満	
III	1方向	0.3mm以上	-	8m/m ² 程度
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	
II	2方向	0.3mm以上	-	

4.2 点検ランクと走行比の関連付け

実橋でのひび割れ密度は10.0~10.4m/m²が限度と考えられる³⁾。また、松井らによってひび割れ密度比(限界ひび割れ密度と発生しているひび割れ密度の比)

と走行比の関係も明らかにされている。ここで、走行比とは実験床版における破壊回数と載荷回数の比で表され、本予測の劣化指標である寿命比、すなわち累積 Neq/N_f と等価と考えてよい。

以上より、本節では点検要領におけるひび割れ密度の目安から、点検ランクと走行比の関連付けを行った。その関係を図-6に示す。同図は縦軸にひび割れ密度比、横軸に走行比をとり、両者の関係を示す松井らの値⁹⁾に近似曲線をひいたものである。点検ランクと走行比を関連付けるためにまず、ひび割れ密度が $10.0m/m^2$ で飽和すると仮定し、点検要領のそれを密度比に変換した。次に、点検ランクの判定基準であるひび割れ密度比 0.4 と 0.8 について平行線を引き、近似曲線との交点から垂線を下ろす事によって、その点を点検ランクの境界とした。また、その値は図より走行比 0.25 と仮定した。図中にはランクⅢとⅡのみ表記されているが、ランクⅢでは OK~Ⅲまでが混在し、ⅡではⅢ~Ⅰが混在する事を示す。

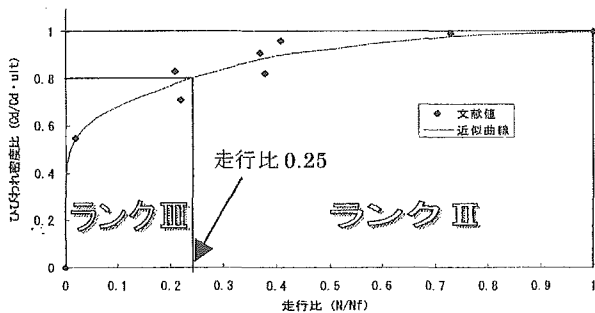


図-6 ひび割れ密度比と走行比およびランクの関係

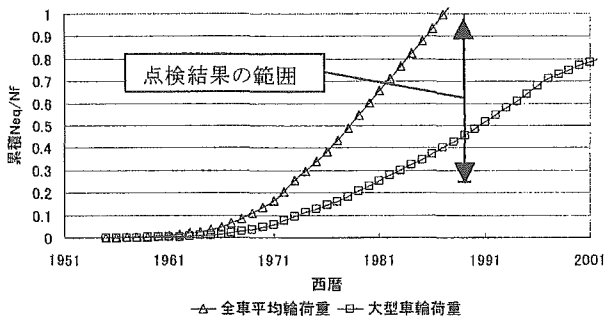


図-7 a 橋の予測結果と点検結果の比較

4.3 比較結果

a 橋の予測結果と点検結果の比較を図-7に示す。同図は、縦軸に寿命比、横軸に西暦をとっている。図中の矢印は実際の点検結果で、そのとり得る範囲を表している。a 橋では 1989 年の点検ランクが I であったので、真の値は範囲内の上方に位置すると考えられる。結果的に a 橋の点検データは予測の範囲内で表され、全車種平均の軸重データを用いた方が安全側に評価された。しかしながら、本結果は橋梁緒元や軸重データ等の誤差を含んでいると考えられる。この問題に関しては今後、設計書の入手や実測、比較データの蓄積により解決され、さらなる精度の向上が期待できる。ま

た、本予測手法は補修・補強履歴のデータ等を用いる事により、その時期および工法選定に有用であると考えられる。

5. 結論

本研究は北海道における実橋の点検データを分類し、交通量の時代変化によって RC 床版の疲労現象が起きていると推察した。また、松井らによって提案された疲労予測式を交通量の時代変化を考慮して実橋に適用し、両者の比較方法を検討する事で、妥当な結果を得た。従って、本劣化予測手法は既存の BMS と連携を図ることで、RC 床版における補修・補強時期および工法選定の判断材料とする事が出来る。また、予測結果を用いる事で、RC 床版の支配的劣化機構を判断する要素にもなり、他の劣化要因による予測にも有益であると考えられる。

今後、橋梁諸元等の詳細なデータの収集、ならびに予測と点検データの比較結果を蓄積することで、さらなる劣化予測の精度向上が期待できる。

謝辞：本研究を行うにあたり、札幌正信客員教授（株式会社フジエンジニアリング）に大変有益なアドバイスを頂きました。また、本研究は平成 15 年度文部科学省科学研究費（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, 2002.4
- 2) 旧建設省土木研究所：橋梁点検要領(案)、土木研究所資料、第 2651 号、1988
- 3) 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、土木学会論文集 No.374/I-6, pp.419-426, 1986.10
- 4) 北海道開発局道路計画課：全国道路交通情勢調査、1996.12
- 5) 松井繁之、小島敬克、島田功、清水誠一、福井降晴、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
- 6) 阪神高速道路公団：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性、1991.12
- 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]、2001.1
- 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
- 9) 北海道開発局道路計画課：交通量常時観測集計報告書、2001
- 10) 橋梁と基礎、既存橋梁床版の維持管理(その 1)、1999.1