

点検データに基づく床版劣化の推定とBMSへの応用

Deterioration estimating of reinforced concrete slab based on inspection data
and its application to BMS(Bridge Management System)

佐藤誠*, 大島俊之**, 三上修一***, 樋口匡****

Makoto Sato, Toshiyuki Oshima, Syuichi Mikami, Masashi Higuchi

*株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4番1号)

**工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

***博(工学) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

****修(工学)トピー工業株式会社(前 北見工業大学大学院修士課程) (〒102-8448 東京都千代田区四番町5-9)

Evaluation of bridge slab deterioration and its degradation prediction based on actual inspection data are dealt with in this paper. To evaluate the slab deterioration, the effects of traffic fatigue, salt damage, freezing and melting and so on, are the elements of evaluation. Inspection data on bridge slab may include the effect of those elements and be useful to analyze the magnitude of the effects. Depending upon the analytical results using actual inspection data, overall prediction method of deterioration is investigated and its prediction will be utilized in Bridge Management System (BMS).

*Key Words: Bridge Management System (BMS), Bridge inspection data,
Reinforced concrete slab, Deterioration prediction*

キーワード: 橋梁維持管理システム, 橋梁点検データ, RC床版, 劣化予測

1. まえがき

本論文は道路橋RC床版の劣化の問題を取り扱っている。RC床版の劣化に関する研究としては松井ら¹⁾の研究が著名である²⁾。従来より平板曲げ理論に基づく道路橋示方書のRC床版設計要領の変遷・改良の歴史に加えて、疲労押し抜きせん断に関する角田ら³⁾の研究など動的輪荷重の影響に関する研究は多くの研究が実施されてきており、研究の歴史は長い^{4),5)}。

一方、鉄筋コンクリート構造部材としてのRC床版の環境耐久性に関する研究も、塩害の影響、アルカリ骨材反応の影響に関する研究、凍結融解に関する研究、中性化による影響の研究など多くの研究があり⁶⁾、これらの研究成果は設計指針などに反映されてきている⁷⁾。

このような中で本論文の目的は、北海道のような積雪寒冷地におけるRC床版の劣化問題を検討することにある。積雪寒冷地に位置づけられる地域は重量交通量が大きい東海地域などと異なり、RC床版を取りまく環境は相対的に交通による影響の他に自然環境による影響や、凍結防止剤散布の影響など、複合的な劣化の影響となっており、これらの複合的影響の程度を解析する必要性が大きい。

従って本論文では、これまでにRC床版の劣化に関し

て発表されている研究成果に基づくとともに、橋梁点検の際に得られているRC床版に関する点検データを詳細に解析して、上記の床版劣化の推定精度を向上しようとするものである。

現在、我が国の橋梁をとりまく環境は、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、設計当初の予測より過酷な条件で長期間供用されており、著しい損傷を持つ橋梁が年々増加する傾向にある。一般に我が国の社会資本施設は、我が国の高度経済成長を支える基盤施設(インフラ)として整備されてきたことから、今後これらの社会資本を維持管理していくためにアセットマネジメントの考え方を導入する必要性が急速に高まってきた⁸⁾。

従って、マネジメントの効果を上げるための維持管理システムが必要であり、橋梁の場合はBMS(Bridge Management System)の運用が必要不可欠である。

これまで開発されてきたBMSでは橋梁点検診断精度の向上、健全度評価、劣化予測システムの検討および補修補強事業支援システムの構築など研究成果が蓄積されてきている^{9),10),11)}。

しかしながら、BMSの現状は実用化までに多くの課題を有している。例えば点検データについては目視による点検要領が統一的に機能しているものの、できるだけ定量的な点検診断が望まれている。また、構造各要素の劣

化予測は構造全体の健全度低下と将来の必要維持補修経費に直結するが、構造各要素の劣化予測精度の向上が望まれる。さらに、ある程度損傷を許容しつつ、維持管理経費を平準化する必要がある、構造全体の定量的モニタリングシステムの実用化が望まれる¹²⁾。

以上のような背景から、本論文では道路橋床版を対象として、これまでの点検データに基づき、床版劣化の検討を実施するとともに、それらの結果を BMS に応用することを目的として影響因子の解析を実施している。

2. BMS における劣化評価の必要性

BMS における健全度低下予測評価の中で、床版劣化予測は大きな要素である。床版の劣化に関する研究や対策に関する研究も多くの蓄積が見られる^{2),6),13),14),15)}。また、床版劣化に影響する交通荷重に関する研究も多くの報告がある^{16),17),18)}。さらに、北海道のように積雪寒冷地の床版の場合には、凍結融解作用、塩害、融雪剤散布など、交通荷重以外の影響要因の影響も大きく、点検データの傾向からこれらの影響因子が連成している状況がある程度は把握する必要がある。BMS は、橋梁点検データベース、健全度評価解析、部材劣化予測および補修事業シミュレーションなどから構成されており、本研究の床版劣化予測と影響因子の分析は必要不可欠であるとともに、この評価精度は BMS 実用化の大きな因子となっている。

3. 点検データに基づく劣化傾向の解析

3.1 解析内容

北海道の国道橋における橋梁点検業務は、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）¹⁹⁾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、健全な方から表-1 のように OK、IV、III、II、I となっており、これらの点検データは現在まで橋梁点検データベースに蓄積されている。橋梁点検データベースには各橋梁の構造部材毎の損傷内容、損傷ランク、点検年などから構成される損傷データに加えて、構造形式や橋長、架設年、路線、施工時に主に使用された示方書の年次などの橋梁仕様データ、および日平均交通量や大型車混入率などの環境データ、さらに、補修・補強履歴などの補修データが蓄積されている。

本章ではこの様な北海道の橋梁点検データベースから RC 床版の点検データを抽出し、大型車交通量、海岸からの距離、凍結融解回数、積雪量、適用示方書などの影響を検討した。なお、本論文では劣化の傾向をみるために、補修・補強された後の点検データは除いて検討を行った。

表-1 損傷度判定標準

判定区分	一般的状況
OK	点検の結果から、損傷は認められない
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある
III	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある
II	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
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となるおそれがある

3.2 荷重分布を考慮した劣化傾向の解析

(1) RC 床版の疲労劣化予測手法^{5),20)}

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。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。これより、本予測では輪荷重走行試験より得られた S-N 曲線にマイナー則を適用し、疲労寿命を推定する。

①マイナー則の適用法と予測式

S-N 曲線として、松井らの輪荷重走行試験より得られた式(1)を適用する⁵⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

ここに、

P：任意の輪荷重

P_{sx} ：有効幅 B のはりの押し抜きせん断耐荷力(N)

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

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：載荷板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式(2)で表される。また、式(2)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。すなわち式(3)が疲労予測の基本式となる。

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

$$T = N_f / N_{eq} \quad (3)$$

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

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

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）

P：任意の輪荷重

n_i ：1 年間に作用する輪荷重の総載荷回数

k：log-log 表示された S-N 曲線の傾き

(2) 実橋への適用方法

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(4)に示す⁵⁾。

$$N_{eq} = \alpha^m \cdot (1+i)^m \cdot (Q_{max}/Q_0)^m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot N_i \quad (4)$$

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 曲線における傾きの絶対値の逆数

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ときの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の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

N_1 : 車両軸数を乗じた単位期間の交通量

(3) モデル橋による適用結果

予測式を実橋に適用するに当たり、式(4)の様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。そこで本節では以下に示すようなモデル橋の条件で疲労劣化予測を行った。

①床版緒元

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⁾における RC 床版の維持管理例を参考にし、解析を行った。解析に用いた床版緒元を表-2 に示す。

表-2 解析に用いた床版緒元

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
設計基準強度	30.0N/mm ²
適用示方書	昭和47年道路橋示方書適用

②衝撃の影響

RC 床版の疲労に適用できるような衝撃係数に関する詳しい実測データがないため、ここでは現行示方書に示されている衝撃係数 $i=20/(50+L)$ (ただし L は床版支間(m)) の式を用いた。

③輪荷重の影響

輪荷重に関する確率密度関数は本来、北海道の国道橋における軸重データを用いるべきだが、実測データが無いので、ここでは東名高速道路で実測された大型車類の平均軸重データの正規分布(69.5,38.8)²¹⁾(kN)、セミトレーラー類の平均軸重データの正規分布(71.4,54.0)²¹⁾(kN)と旧建設省の全国平均の軸重データ式(5)²⁰⁾を用いた。ここで用いた輪荷重頻度分布を図-1 に示す。なお、計算には輪荷重を用いるため、軸重を 2 で除して輪荷重頻度分布と仮定し、全国平均、大型車類は 2 軸、セミトレーラー類は 3 軸として計算した。

$$\log\{100F(p)\} = -0.2732 - 0.12135p - 0.001767p^2 \quad (5)$$

$F(p)$: 軸重の確率分布

p : 軸重(kN)

以上の条件で行った疲労予測結果を図-2 に示す。同図の縦軸は累積 N_{eq} と N_f の比であり、値が 1 になった時に床版が疲労破壊することを表す。また、横軸は全国平均、大型車類、セミトレーラー類、それぞれの通過台数を表す。軸重の実測データは無いが、北海道の国道橋の疲労予測結果は全国平均の軸重データおよび東名高速道路の大型車類の軸重データを用いた予測結果の付近であることが予想される。また、これらと比較する目的で通常よりも厳しい荷重条件であるセミトレーラー類の予測結果も示した。ここで得られた予測結果は 5 章で点検データ

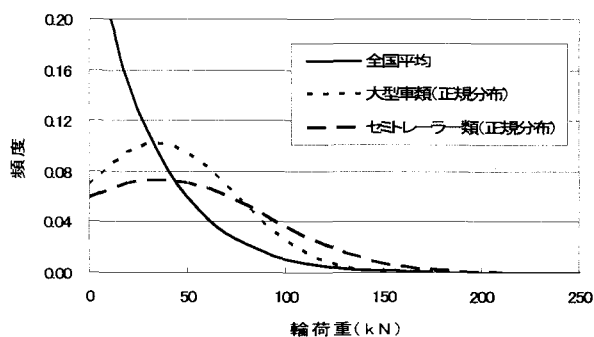


図-1 疲労予測に用いた輪荷重頻度分布

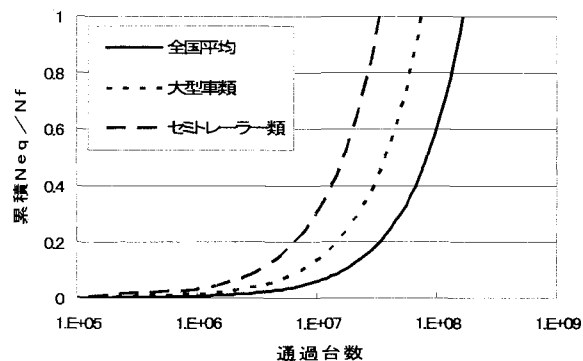


図-2 疲労予測結果

との比較に用いる。

3.3 塩害の影響²²⁾

海岸に近い場所に位置する橋梁では、飛来塩分により RC 床版内部の鉄筋が腐食膨張し、ひび割れが発生する危険性がある。このような塩害の影響として本節では、「北海道における鋼道路橋の設計および施工指針」²²⁾の北海道における塩害対策地域と腐食環境地域に従って、RC 床版の点検データを以下の 3 段階のランクに分類した。この分類は日本道路協会「道路橋の塩害対策指針(案)」に準じたものであり、太平洋側の地域については塩害の全国被害実態調査時点(昭和 57 年)で既に廃橋となった橋梁の中で、同地域に多くの塩害を受けた橋梁があったことを考慮して追加修正されたものである。

(1) 塩害ランク 3 (厳しい腐食環境)

日本海側および太平洋側の一部の地域で海岸線から 200m 以内の部分、その他の地域では海岸線から 100m 以内の部分。

(2) 塩害ランク 2 (やや厳しい腐食環境)

海岸線から 2km 以内の部分。

(3) 塩害ランク 1 (一般環境)

上記以外の部分。

3.4 凍結融解作用の影響

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、コンクリート内部の水分が凍結融解を繰り返すことで、ポップアウトやスケーリングによるかぶり減少が起こる。また、既存ひび割れに進入した水によって、ひび割れ幅の増大を招く危険性もある。このような凍害の影響を考慮するために、本節では、年間の凍結融解回数によって地域を 4 段階に分類した²³⁾。これを表-3 に示す。

3.5 積雪量の影響（凍結防止剤）

北海道における気候条件の特色の1つに積雪がある。積雪の影響は他の環境要因と異なり、積雪の保温効果によって凍結融解回数が減少する可能性がある。しかし、積雪が多い地域などは、近年散布し始めた凍結防止剤の影響も考えられ、これによる鉄筋腐食の被害も報告されている²⁴⁾。ここでは、表-4に示すように最大積雪量に従って地域を6段階に分類した。

3.6 適用示方書の影響

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、性能および耐力が変化する。これらの設計条件が劣化に与える影響として、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ことから、以下の3段階のランクに分類した。

- (1) 示方書ランク 3（昭和42年以前）
- (2) 示方書ランク 2（昭和43～48年）
- (3) 示方書ランク 1（昭和53年以降）

表-3 凍結融解ランク

凍結融解ランク	1	2	3	4
凍結融解回数(回/年)	～100	100～150	150～200	200～250

表-4 積雪ランク

積雪ランク	1	2	3	4	5	6
最大積雪量(cm)	～100	100～150	150～200	200～250	250～300	300～

4. 影響因子の解析結果

4.1 北海道全域を対象とした影響因子の解析結果

本節では3章の環境分類に従い、北海道全域を対象として単回帰分析とともに重回帰分析および主成分分析を行った。対象としたデータは北海道の国道橋で1988～2001年までに点検が行われた橋梁のうち、上部構造にRC床版を用いている1285橋であり、供用期間は1～66年である。また、橋梁点検データベースの損傷ランクは主桁と横桁に囲まれている床版パネル単位で損傷毎にランクが記入されており、同一橋梁で複数回点検が行われた場合は、それぞれ別データとして解析を行った。

(1) ひび割れについて

① 大型車交通量の影響

床版ひび割れと大型車の関係を図-3に示す。同図の縦軸は各橋梁の床版パネル毎のひび割れに関する損傷ランクを橋梁毎に平均した値(以下ひび割れランク)であり、OKが健全な状態、Iが劣化している状態を表す。横軸は供用開始から点検時までの延べ交通量を総合的に表したものであり、この指標によって供用期間と大型車台数の影響を同一の軸で表すことが出来る。全体的にばらついた結果となったが、各ランクにおいて最も大型車が少ない領域のプロットに着目すると、大型車が多い方が劣化している傾向が得られている。なお、橋梁点検データベースでは部材に損傷が確認された場合に損傷の程度を入力し、損傷が著しく損傷ランクIと判定された場合は、早急に補修あるいは交通規制を行うため、データベースには損傷ランクOKとIは存在しない。このことから図-3においてもひび割れランクOKとIが存在しない。

② 環境条件の影響

これまでに蓄積されてきた点検データはばらつきが大

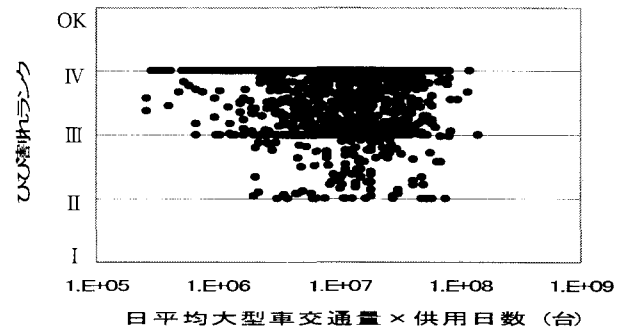


図-3 ひび割れランクと大型車の関係

表-5 ひび割れランクと環境ランクの相関係数

	ひび割れ ランク	供用日数× 大型車	積雪ランク	塩害ランク	凍結融解 ランク	示方書 ランク
ひび割れランク	1					
供用日数×大型車	-0.084	1				
積雪ランク	0.030	-0.197	1			
塩害ランク	-0.043	0.005	-0.329	1		
凍結融解ランク	0.012	0.085	-0.357	-0.203	1	
示方書ランク	-0.244	0.274	-0.052	-0.057	0.029	1

表-6 ひび割れランクと環境ランクの重回帰分析結果

説明変数	供用日数×大型車 積雪ランク	供用日数×大型車 塩害ランク	供用日数×大型車 凍結融解ランク	供用日数×大型車 示方書ランク
重回帰統計				
重相関係数R	0.085	0.094	0.086	0.245
重決定R ²	0.007	0.009	0.007	0.060
自由度補正済みR ²	0.006	0.008	0.006	0.059
標準誤差	0.479	0.478	0.479	0.466
観測数	1602	1602	1602	1602

きく、本節の解析結果は全体的に相関が低いものであり、劣化影響因子を断定することは難しい。しかしながら、前述のように積雪寒冷地に位置付けられるような地域の床版劣化には、相対的に交通による影響の他に自然環境による影響や凍結防止剤などの影響が考えられることから、本節は3章のような地域による環境条件を考慮した結果について述べる。

ひび割れランクと環境条件の相関係数を表-5に示す。ひび割れランクは数値が大きいほうが健全な状態を表すのに対し、環境条件のランクは数値が大きいほうが劣化に対して厳しい環境を表す。従って、ひび割れによる劣化に環境の影響があった場合には、両者からマイナスの相関係数が得られる。これより、ひび割れによる劣化には、大型車と塩害が影響していることがわかる。一方、示方書とひび割れランクの相関係数は-0.244であり、5項目中、最も大きい相関係数が得られた。これは、適用示方書と供用年の関係が大きく影響しており、比較的新しい適用示方書の床版は供用期間が短く健全なものが多いため、このような傾向になったと考えられる。

③ 重回帰分析による解析結果

ひび割れランクを目的変数とし、説明変数に大型車×供用日数と環境ランクを用いて重回帰分析を行った結果を表-6に示す。表中には重回帰結果として重相関係数、重決定係数、自由度補正済みR²値、標準誤差、観測数を記した。重相関係数に着目すると、大型車交通量と塩害ランク、凍結融解ランクにおいて、単相関の場合よりも係数が大きくなった。また、大型車交通量と示方書ランクを説明変数とした場合は、単相関の場合と同様に示方

表-7 ひび割れランクの主成分分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
固有値	1.220	1.095	0.908	0.778
寄与率	0.305	0.274	0.227	0.194
累積寄与率	0.305	0.579	0.806	1
固有ベクトル				
凍結融解ランク	0.707	-0.064	0.002	0.704
塩害ランク	-0.665	-0.216	0.305	0.647
供用日数×大型車	0.227	-0.683	0.630	-0.292
ひび割れランク	0.081	0.695	0.714	-0.021

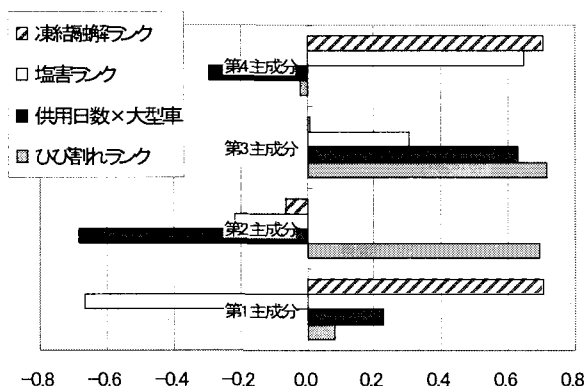


図-4 主成分と固有ベクトルの関係（ひび割れ）

書の年代による影響を大きく受けた形となった。なお、説明変数を3つ以上にすると自由度補正済み R^2 値が低くなり、説明力が落ちるため説明変数が2つまでの結果を記した。

以上より、重回帰分析を行った結果からはひび割れランクは大型車と塩害、凍害の影響を受けている事が分かる。

④主成分分析による解析結果

北海道全域を対象とした場合、ひび割れランクは図-3の様にばらつきが大きくなる。そこで、劣化傾向が得られているケースを弁別して、劣化影響因子を検討するために主成分分析を行った。分析を行う際には各項目の単位が異なるため、データを基準化して元の分散の違いを補正した。その結果を表-7、図-4に示す。

表-7は4つの主成分におけるそれぞれの分散(固有値)と寄与率、および主成分を合成するための係数を示しており、図-4は同係数を主成分毎にまとめたものである。第2主成分に着目すると、ひび割れランクはプラスの係数、他の項目はマイナスの係数で合成された指標になっている。従って、第2主成分得点はひび割れランクが高く、かつ他の環境ランクが低い方が高得点になる。このことから、ひび割れランクの劣化影響因子として大型車、塩害、凍害が考えられる。さらに、これらの影響の大きさは係数の絶対値で推測することが出来る。

同様に、第1主成分では劣化影響因子として塩害が考えられる。逆に、第3主成分では全ての項目がプラスの係数になっている。これは供用期間が長い場合や、厳しい環境条件に関わらず、劣化していないひび割れランクが存在するため、それらの傾向を表していると考えられる。劣化が進行しない理由としては、塩害対策などを行っている場合や、大型車台数と供用年を乗じたことによって生じる年代変化の誤差、および軸重の誤差が考えられる。

(2) 剥離・鉄筋露出について

各橋梁の床版パネル毎の剥離・鉄筋露出に関する損傷

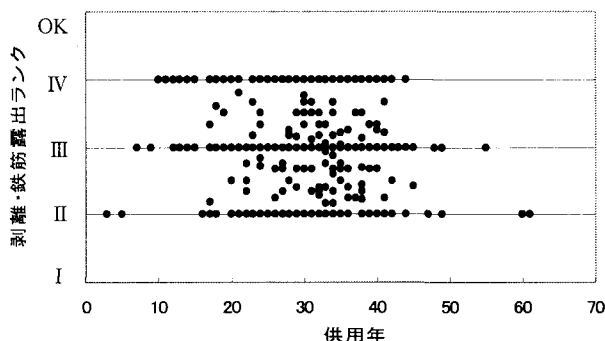


図-5 剥離・鉄筋露出ランクと供用年の関係

表-8 剥離・鉄筋露出ランクと環境ランクの相関係数

	剥離・鉄筋露出ランク	供用日数×大型車	積雪ランク	塩害ランク	凍結融解ランク	示方書ランク
剥離・鉄筋露出ランク	1					
供用日数×大型車	-0.055	1				
積雪ランク	0.026	-0.171	1			
塩害ランク	-0.128	0.044	-0.308	1		
凍結融解ランク	0.008	0.070	-0.443	-0.124	1	
示方書ランク	0.022	0.115	0.045	0.014	-0.070	1

表-9 剥離・鉄筋露出ランクと環境ランクの重回帰分析

説明変数	大型車・積雪	大型車・塩害	大型車・凍結融解	大型車・示方書	塩害・積雪	塩害・凍結融解
重回帰 R	0.058	0.137	0.057	0.062	0.128	0.128
重決定 R^2	0.003	0.019	0.003	0.004	0.016	0.016
自由度補正済み補正 R^2	0.000	0.015	-0.001	0.000	0.013	0.013
標準誤差	0.584	0.580	0.584	0.584	0.580	0.580
観測数	523	523	523	523	523	523

表-10 剥離・鉄筋露出ランクの主成分分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
固有値	1.186	1.085	0.913	0.816
寄与率	0.297	0.271	0.228	0.204
累積寄与率	0.297	0.568	0.796	1
固有ベクトル				
凍結融解ランク	0.426	0.624	-0.353	0.551
塩害ランク	-0.699	-0.048	0.157	0.696
供用日数×大型車	-0.169	0.707	0.634	-0.263
剥離・鉄筋露出ランク	0.548	-0.329	0.670	0.378

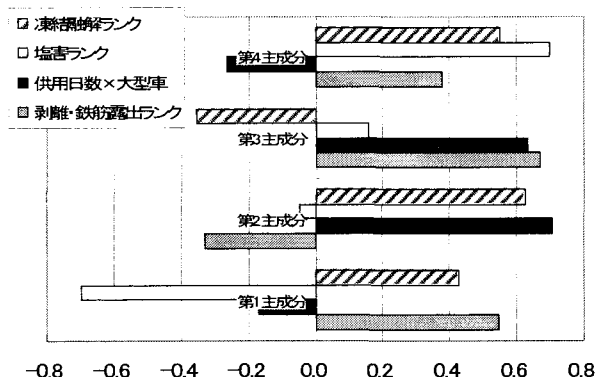


図-6 主成分と固有ベクトルの関係（剥離・鉄筋露出）

ランクを橋梁毎に平均した値（以下剥離・鉄筋露出ランク）と供用年の関係を図-5に示す。また、前項と同様に、

回帰分析、主成分分析を行った結果を表-8～10 および図-6 に示す。図-5 より、供用 10 年未満の領域において、ランクⅡのプロットが2つ確認出来る。これらは大型車が比較的少ない環境にあり、一方の塩害ランクが 3、もう一方が 1 である。前者が早期に劣化した原因として、塩害の影響が考えられる。それと共に施工時の施工不良によるかぶり不足などがあった場合、鉄筋が腐食しやすくなり、早期に局部的な鉄筋露出を生じた場合なども考えられ、剥離・鉄筋露出ランクがⅡになる可能性がある。これはランクⅣ、Ⅲ、Ⅱが横並びにプロットされている原因でもあり、剥離・鉄筋露出ランクの特徴である。

剥離・鉄筋露出ランクに対する環境条件の影響は、表-8 の相関係数より、塩害ランクと大型車に対して相関があることがわかる。表-9 の重回帰分析結果においても、大型車と塩害ランクを説明変数としたものが最も相関が高く、説明力が高い。

表-10 の主成分分析による結果では、第 1 主成分において塩害の影響が大きく、次いで大型車の影響が大きい。また、第 2、3 主成分では凍結融解作用の影響が大きく、第 2、4 主成分では大型車の影響も大きい。しかし、第 3 主成分までの累積寄与率は 79.6% であることから、第 4 主成分の影響は小さいと解釈出来る。

以上から、RC 床版の剥離・鉄筋露出に影響を与える因子は海岸からの距離、凍結融解回数、大型車交通量であり、中でも塩害の影響が強いと考えられる。

(3) 遊離石灰について

各橋梁の床版パネル毎の遊離石灰に関する損傷ランクを橋梁毎に平均した値（以下遊離石灰ランク）と供用年の関係を図-7 に示す。また、前項と同様に回帰分析、主成分分析を行った結果を表-11～13 および図-8 に示す。図-7 では遊離石灰ランクⅣが存在していないが、これは橋梁点検要領（案）による損傷判定において、主部材ではランクⅡとランクⅢのみが規定されているためである。遊離石灰ランクでは、前出の剥離・鉄筋露出ランクと同様にランクⅢ、Ⅱが横並びにプロットされている。

遊離石灰に対する環境条件の影響は、表-11 より塩害、積雪、大型車と相関があり、第 1 主成分では大型車と塩害の影響が大きく、寄与率が 34% と高い。また、第 2 主成分で積雪、第 3 主成分で塩害の影響が大きい。

以上から RC 床版の遊離石灰は塩害、大型車、積雪の影響を受けていると考えられる。塩害と大型車については発生したクラックに水が浸入して、遊離石灰が発生したと予想される。一方、積雪については積雪量の多い地域に散布されている凍結防止剤の影響が予想され、塩化カルシウムなどとの化学反応によって遊離石灰が発生した可能性がある。

4.2 建設部毎に分類した影響因子の解析結果

4.1 節では北海道全域を対象とした床版の劣化に対する環境の影響が得られた。本節では解析の対象とする地域を限定することで、各地域の特色を考察するために、建設部毎（A～J）に点検データを分類して解析を行った。その結果を表-14～表-16 に示す。なお、この表では相関係数がマイナスになったものを数値で示しており、プラスの相関係数が得られた場合を「-」で示している。

(1) ひび割れについて

ひび割れに対する劣化影響因子は、大型車の影響が強

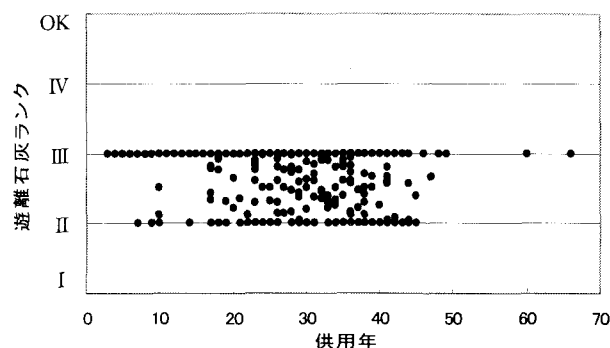


図-7 遊離石灰ランクと供用年の関係

表-11 遊離石灰ランクと環境ランクの相関係数

	遊離石灰 ランク	供用日数 ×大型車	積雪ランク	塩害ランク	凍結融解 ランク	示方書 ランク
遊離石灰ランク	1					
供用日数×大型車	-0.064	1				
積雪ランク	-0.076	-0.195	1			
塩害ランク	-0.085	0.049	-0.304	1		
凍結融解ランク	0.059	0.070	-0.387	-0.189	1	
示方書ランク	-0.081	0.200	0.070	-0.035	-0.047	1

表-12 遊離石灰ランクと環境ランクの重回帰分析結果

回帰統計	説明変数	大型車-積雪	大型車-塩害	大型車-凍結融解	大型車-示方書	塩害-積雪	塩害-凍結融解
重相関 R		0.111	0.104	0.090	0.095	0.136	0.095
重決定 R ²		0.012	0.011	0.008	0.009	0.018	0.009
自由度補正済み補正 R ²		0.010	0.009	0.006	0.007	0.016	0.007
標準誤差		0.313	0.313	0.314	0.314	0.312	0.314
観測数		916	916	916	916	916	916

表-13 遊離石灰ランクの主成分分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
固有値	1.387	1.042	0.953	0.618
寄与率	0.347	0.261	0.238	0.154
累積寄与率	0.347	0.607	0.846	1.000
固有ベクトル				
塩害ランク	-0.599	0.067	0.558	0.570
積雪ランク	0.673	0.283	-0.010	0.683
供用日数×大型車	-0.428	0.197	-0.819	0.328
遊離石灰ランク	0.070	-0.936	-0.135	0.317

い地域が多い。この影響の大きさには、地域による大型車の軸重頻度分布の影響が考えられ、影響が大きい地域は、大型車の中でも車両重量が大きいものが多いと考えられる。また、C,E,G 建設部においては塩害と積雪の影響が強く、交通荷重よりも鉄筋腐食によるひび割れが多いと考えられる。さらに、凍害に関しては北海道全体でみるとひび割れとの相関は無かったが、B 建設部で凍害の影響がみられた。

(2) 剥離・鉄筋露出について

剥離・鉄筋露出に対する劣化影響因子は、塩害の影響が強い地域が多く、相関係数が全体的に大きい。このことから、剥離・鉄筋露出に対する塩害の影響が非常に大きいことがわかる。また、G 建設部においては、塩害に加えて凍害とも強い相関が得られており、損傷データ数が最も多い結果となっている。これは、鉄筋の腐食によ

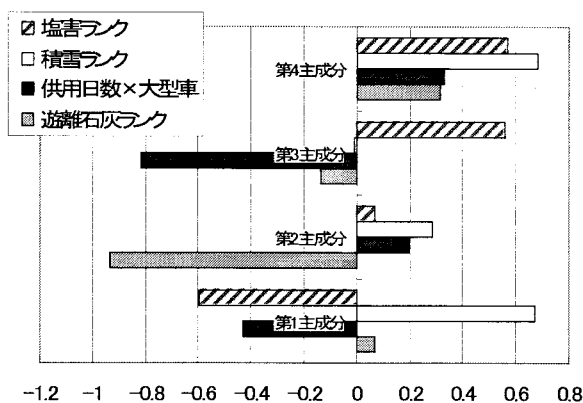


図-8 主成分と固有ベクトルの関係（遊離石灰）

表-14 ひび割れランクに対する相関係数

建設部	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
環境	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供用日数×大型車	-	-0.16	-	-0.12	-	-0.11	-0.03	-0.15	-	-0.29
積雪ランク	-	-	-	-	-0.15	-	-0.24	-	-0.04	-
塩害ランク	-	-	-0.16	-	-	-	-	-0.23	-	-0.09
凍結融解ランク	-0.07	-0.20	-	-0.02	-	-0.04	-0.08	-	-	-
示方書ランク	-0.17	-0.20	-0.36	-0.23	-0.22	-0.31	-0.26	-0.25	-	-0.37
データ数	199	200	104	142	152	368	202	156	49	89

表-15 剥離・鉄筋露出ランクに対する相関係数

建設部	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
環境	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供用日数×大型車	-	-	-0.01	-0.07	-0.16	-0.05	-0.01	-	-	-0.25
積雪ランク	-	-0.02	-0.05	-0.13	-0.21	-	-	-0.13	-0.18	-
塩害ランク	-	-0.24	-0.32	-	-	-	-0.26	-	-	-0.25
凍結融解ランク	-0.13	-	-0.05	-	-	-0.08	-0.23	-	-	-
示方書ランク	-	-	-	-	-0.22	-0.02	-0.07	-0.05	-0.15	-
データ数	62	55	35	43	54	82	93	46	16	37

表-16 遊離石灰ランクに対する相関係数

建設部	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
環境	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
供用日数×大型車	-	-0.01	-0.25	-0.08	-0.04	-	-0.06	-0.14	-	-
積雪ランク	-0.15	-	-0.14	-0.06	-0.03	-0.07	-0.09	-	-0.10	-0.26
塩害ランク	-	-	-0.03	-0.12	-0.06	-	-0.18	-0.14	-	-0.02
凍結融解ランク	-0.04	-0.12	-	-	-	-0.17	-	-	-	-0.27
示方書ランク	-0.16	-0.10	-0.24	-0.19	-0.02	-	-0.03	-0.23	-	-0.14
データ数	143	104	58	101	82	140	108	87	30	63

る膨張が両者の影響を大きく受けた結果と考えられる。さらに、H,I 建設部においては積雪の影響が強く、凍結防止剤の影響が考えられる。

(3) 遊離石灰について

遊離石灰に対する劣化影響因子は、北海道全域を対象とした場合と同様に、多数の影響因子との相関が得られた。C 建設部においては大型車との相関が高く、J 建設部においては積雪と凍害の相関が大きい結果となった。このように、遊離石灰に対する影響因子は、地域によって大型車や凍結防止剤など多数の劣化要因が考えられる。

5. 劣化推定の判定

5.1 判定内容

3.1 節で述べた劣化予測の対象となる指標は、等価に換算した繰り返し回数であり、破壊回数と累積走行回数の

表-17 ひび割れランクの判定基準

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

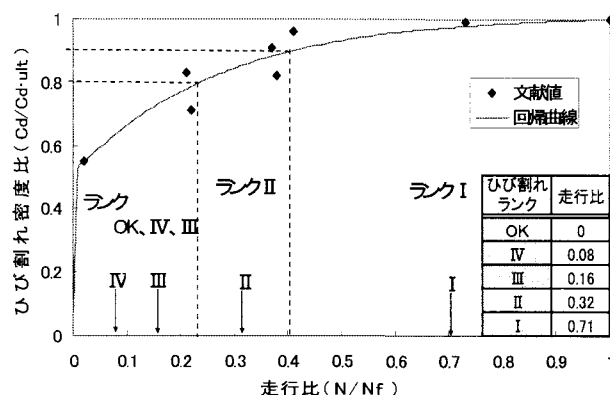


図-9 ひび割れ密度比と走行比およびランクの関係

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。そのため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。

以上より、本章では予測結果とひび割れランクの比較方法を検討し、両者を比較することで劣化推定の判定とBMS への応用を検討した。

5.2 点検要領¹⁹⁾による判定基準

ひび割れランクの判定基準^{19),25)}を表-17 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、表中にひび割れランク OK と I が存在しないが、これは表-1 より OK は各項目に該当せず健全な状態、I は補修等を早急に行う必要がある項目であるため除外した。

5.3 ひび割れ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¹⁾。また、松井らによってひび割れ密度比(限界ひび割れ密度 Cd_{ult}と発生しているひび割れ密度 Cd の比)と走行比の関係も明らかにされている。ここで、走行比は実験床版における破壊回数と荷重回数の比で表され、本予測の劣化指標である寿命比、すなわち累積 N_{eq}/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、ひび割れランクと走行比の関連付けを行った。その関係を図-9 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実験値¹⁾に回帰曲線をひいたものである。回帰曲線の傾向を以下に示す。

走行比>0.02

$$y=201.66/(1+0.024971\text{EXP}(-3.6318x))-200.65$$

走行比 <0.02

$C_d/C_d \cdot \text{ult} \rightarrow 0$ (急速にゼロに接近)

ひび割れ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、点検要領のひび割れ密度を密度比に変換した。次に、ひび割れランクの判定基準であるひび割れ密度比 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、その点をひび割れランク OK~III と II, I の境界とした。さらに、ひび割れ密度比 0.8 と 1.0 の中点である 0.9 から平行線を引いてランク II と I の境界も設けた。最終的に、設けた領域を等分割してひび割れランクと走行比の関係を仮定した (図中右表)。

5.4 疲労予測結果とひび割れランクの比較

前節のひび割れランクと走行比の関係より、ひび割れランクと疲労予測結果を比較した 1 例を図-10 に示す。同図は 3 章の疲労予測結果と B 建設部における各橋梁のひび割れランクを比較したものであり、凡例の「点検データ」は各橋梁のひび割れランクを表す。横軸は予測における各車種の通過台数を表し、点検データにおいてはデータベースから得られた各橋梁の日平均大型車交通量 $\times$ 供用日数を表す。左側の縦軸は疲労劣化予測の指標である累積 Neq/Nf を表す。また、右側の縦軸は図-9 右下表より作成したひび割れランクの軸を表し、点検データはこの軸上にプロットした。

この結果、概ね点検データが全国平均とセミトレーラー類の輪荷重頻度分布を用いた予測結果付近にプロットされた。ここで、全国平均および大型車類に対してセミトレーラー類の予測曲線は非常に厳しい荷重条件であり、実橋の大型車類が全てセミトレーラー類と同等の軸重であることは考えがたい。従って、セミトレーラー類の予測曲線付近のデータは、疲労に加えて他の環境による劣化要因が複合して作用していることが考えられる。この要因としては B 建設部のひび割れに影響を与える環境要因が表-14 より、大型車と凍結融解であることから、セミトレーラー類の予測曲線付近および、左側 (危険側) のデータは疲労に加えて凍害の影響も受けていることが推測される。これらの結果は他の建設部についてもほぼ同様である。

この様に、建設部や路線毎に交通量データや環境データを用いて劣化傾向を分析し、その傾向に応じて予測曲線を作成することで BMS への応用精度を向上していくことが出来る。

6. 結論

本研究では道路橋 RC 床版を対象として、これまでの点検データに基づき、床版劣化の検討を実施するとともに、それらの結果を BMS に応用することを目的として影響因子の解析を実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 床版ひび割れについては大型車の影響が支配的であり、続いて塩害、凍害の影響も一部の地域でみられた。
- (2) 剥離・鉄筋露出については、塩害の影響が支配的であり、地域によって大型車と凍害の影響がみられた。
- (3) 遊離石灰については大型車、積雪、塩害の影響がみられた。このことから、遊離石灰の劣化は大型車による

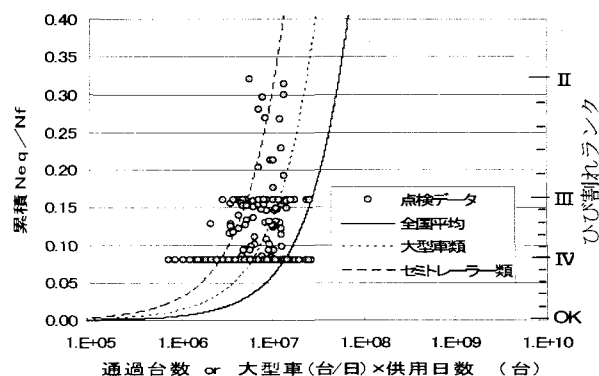


図-10 疲労予測結果と点検データの比較 (B 建設部)

疲労と飛来塩分による塩害と共に、凍結防止剤による塩害の影響も考えられる。

- (4) 建設部毎に点検データを分析することで、各地域の劣化影響因子の特性が得られ、北海道全域よりも相関が高い結果が得られた。従って、床版劣化予測の精度を向上させるためには、劣化影響因子の分析を地域毎に検討する必要がある。
- (5) 各建設部のひび割れランクについて、疲労予測結果と比較を行った。その結果、一部のデータは危険側にプロットされたが、おおむねデータが予測の範囲内にプロットされた。従って、床版ひび割れの劣化予測をするためには疲労予測を主として行い、他の劣化要因については、地域により必要に応じて考慮する必要があると考えられる。

最後に今後の課題として、疲労予測に必要となる実交通の荷重実態や、床版の圧縮強度などをデータベースに蓄積し、本論文で行った床版の劣化影響因子を考慮して、BMS の部材劣化予測精度向上に応用していく予定である。

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、大阪大学大学院工学研究科 松井繁之教授に大変有益なアドバイスと貢献を頂き、北見工業大学維持管理工学研究部の鈴木広大君にはデータ整理にご協力を頂きました。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。

また、本研究は平成 16 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) 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.
- 2) 河西龍彦、小林朗：RC 床版の設計法の変遷と今後の課題、第 1 回 鋼橋床版シンポジウム講演論文集、土木学会、pp.1-4, 1998.
- 3) 角田与史雄、藤田嘉夫：RC 床版の疲労押し抜きせん断強度に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 317 号、pp.149-157, 1982.
- 4) 鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ、土木学会関西支部、1977.

- 5) 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，阪神高速道路管理技術センター，1991.
- 6) 鋼橋床版の調査研究小委員会編：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，土木学会 鋼構造委員会，1998.
- 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) 土木学会誌特集：社会資本へのアセットマネジメント導入に向けて，Vol.89-8，土木学会誌，pp.9-47，2004.
- 9) 宮本文穂，串田守可，足立幸朗，松本正人：Bridge Management System (BMS) の開発，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.91-106，1997.
- 10) 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.
- 11) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.29-38，2003.
- 12) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，構造工学シリーズ 10，2000.
- 13) 中川貴之，松島学，堤知明，村上祐治：塩害を受ける RC 構造物の劣化予測システムの開発，構造物の診断に関するシンポジウム 論文集，構造工学技術シリーズ No.5，土木学会，pp.255-262，1998.
- 14) 上阪康雄：合成桁 RC 床版の現状と課題，第 1 回 鋼橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.5-10，1998.
- 15) 内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第 1 回 鋼橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.33-42，1998.
- 16) 西川和廣，村越潤，宮崎和彦：橋梁を用いた車両重量の計測 (WIN) システムの開発，土木技術資料 38-1，pp.8-9，1996.
- 17) 小塩達也，山田健太郎，深津伸：BWIN による大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1055-1062，2002.
- 18) 米田昌弘，板元勝哉：GA を適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.755-765，2003.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会，1995.
- 23) 富板崇，浜幸雄，田畑雅幸，鎌田英治：コンクリートの凍害を対象とした気象環境評価の一提案，自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，pp.279-284，1993.
- 24) 鳥居和之，奥田由法，松田康孝，川村満紀：凍結防止剤の影響を受けた ASR 損傷コンクリート橋脚の調査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.173-178，1998.
- 25) 松井繁之，大田孝二，西川和廣：既存橋梁床版の維持管理(その 1)，橋梁と基礎，vol.32，No.1，1999.

(2004 年 9 月 17 日受付)