

床版の圧縮強度分布と簡易疲労劣化予測手法の研究

Study on simplified fatigue deterioration prediction technique and compression strength distribution of the concrete slab

北見工業大学大学院 ○学生員 鈴木広大 (Suzuki Kouta)

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 正員 竹田俊明 (Toshiaki Takeda)

1. はじめに

現在、我が国で供用されている橋梁の多くは、交通量の増加などの周辺環境の変化により、著しい損傷を持つ橋梁が年々増加する傾向にあり、適切な維持管理による延命化が急務となっている。このような背景から、橋梁を包括的に維持管理するシステム Bridge Management System (以下、BMS) の研究開発が行われてきた^{1),2)}。これまで開発されてきた BMS は主に、橋梁点検、健全度評価、部材劣化予測、事業シミュレーションなどから構成されており、橋梁点検および健全度評価のシステムが確立されている。また、部材劣化予測システムの検討および補修事業支援システムの構築などの研究成果も蓄積されてきている³⁾。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おり、特に劣化予測部門においては、劣化予測システムの構築、および構造各要素における劣化予測精度の向上が大きな課題となっている。

以上のような背景から、本論では道路橋床版の劣化に関して、これまで発表されている研究成果と北海道で蓄積されてきた橋梁点検データに基づくとともに、新たに実測したデータである床版コンクリートの圧縮強度 (以下、床版圧縮強度) を予測に用いることで、床版の疲労劣化予測を行うとともに、それらの結果を BMS に応用することを目的として、劣化予測精度の検討を実施している。

2. 道路橋床版の劣化

床版の劣化に関する研究は松井らによる研究が著名であり、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、この予測式には詳細な橋梁の構造諸元等が必要であり、実橋からは測定の難しい各パラメータが必要であることなどから、点検データ項目に限りのある BMS へ応用することはこれまで困難であった。そこで、本論では BMS の劣化予測システムへの松井式の応用を試みるとともに、松井式に必要なデータ項目である床版コンクリートの圧縮強度を測定し、その測定結果を分析し、測定値の分布を確率的な疲労劣化予測として用いる手法を提案する。また、その松井式のパラメータである床版の圧縮強度値が予測結果に及ぼす影響を検討した。

3. 床版の疲労劣化予測手法

3.1 疲労劣化予測式

繰り返し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、本論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⁴⁾。

$$T_f = N_f / N_{eq} \quad (1)$$

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

ここに、

T_f : 疲労寿命

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 : 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力 (N)

$$P_{sx} = 2B \{ (0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2) \cdot X_m + 0.583 \sigma_{ck} \cdot C_m \}$$

B : はりの有効幅 (cm)

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

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)

この松井式の中で用いる各パラメータの中でも、特に予測結果に大きな影響を及ぼすのが交通荷重と床版コンクリートの圧縮強度値である。そこで、本論では予測精度の向上に必要な不可欠な因子であるこの交通荷重と床版の圧縮強度に着目した。

3.2 交通荷重の影響

松井式では交通荷重による影響を、橋梁上を通行する車両の輪荷重に関する確率密度関数として考慮している。しかし、北海道における交通荷重測定データがないため、本予測では旧建設省の全国平均の軸重データ式(3)⁴⁾を用いた。また、予測計算には輪荷重を用いる必要があるため、軸重を 2 で除して輪荷重頻度分布と仮定し、全て 2

軸車としている。

$$\log\{100F(p)\} = -0.2732 - 0.12135p - 0.001767p^2 \quad (3)$$

F(p) : 軸重の確率分布

p : 軸重(kN)

3.3 床版圧縮強度の影響

床版圧縮強度に関するデータは、予測式におけるその重要性とは異なり、データの蓄積はこれまでなされていないのが現状である。コンクリート強度の推定法としては、テストハンマーによる反発度法や、小径コア採取による圧縮強度試験法などがある。実橋からより多くのデータを採取するには、測定時間や測定法がより短く、簡易的なものであることが望まれる。そこで、本論ではテストハンマーによる反発度法により、床版圧縮強度を推定するものとした。床版圧縮強度の推定法については4章で述べる。

なお、交通荷重と床版圧縮強度以外の予測式に必要なパラメータについては、示方書⁵⁾のモデル床版の値により予測を行っている。

4. 床版圧縮強度測定値の分析

4.1 床版コンクリートの圧縮強度推定法

前述のように、松井式に用いられる橋梁諸元の中でも予測に大きな影響を及ぼすのが床版圧縮強度である。そこで、本論ではこの床版圧縮強度を簡易的に推定できる手法としてシュミットハンマーを用いた測定をこれまで行ってきた。具体的な測定方法としては、床版下面のコンクリートをシュミットハンマーで打撃し、その反発度から床版コンクリートの圧縮強度を推定するというものである。測定から得られた反発度からの強度推定式としては、何種か提案されているが、本論では日本材料学会式(4)⁶⁾を用いて圧縮強度を推定している。また、各補正に関する補正係数表を表-1~表-3に示す。補正係数は実橋から判別できるもののみを考慮して補正を行っている。

$$F = \alpha \cdot [13 \cdot \{R_0 + (R_1 + R_2)\} - 184] \quad (4)$$

F : 圧縮強度(kgf/cm²)

α : 材令補正值

R₀ : シュミットハンマーの反発度

R₁ : 含水状態の補正值

R₂ : 打撃角度の補正值

表-1 材令補正表

材令(日)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1,000	1,000以上
α	1.2	1.04	1	0.98	0.95	0.91	0.86	0.78	0.7	0.63	0.6

表-2 含水状態補正表

含水状態	南面気乾	北面気乾	湿潤
補正值	0	+1	+5

表-3 打撃角度補正表

反発度 R	傾斜角に対する補正值(ΔR)			
	+90°	+45°	-45°	-90°
10	-	-	+2.4	+3.2
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
40	-3.9	-2.6	+2	+2.7
50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7

4.2 床版コンクリートの圧縮強度測定結果

これまでに蓄積した圧縮強度値の測定数は、道東地域を中心とした国道橋約250橋である。その測定値の分布を図-1に示す。図の縦軸は圧縮強度測定値、横軸は測定橋梁の供用年をとっている。図から、圧縮強度値はほぼ均等にばらついているのがわかる。これは、測定橋梁毎に構造形式が異なることや、シュミットハンマー自体の精度によるばらつきなど様々な要因が作用し、幅広い範囲を持ちばらつく結果となったと考える。

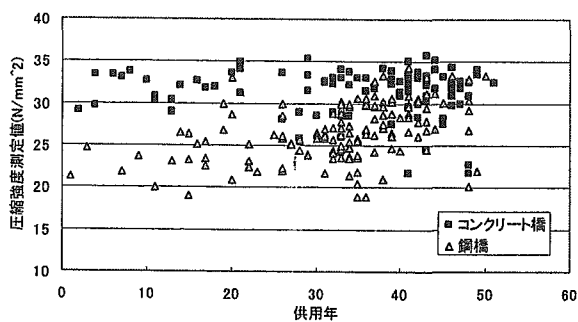


図-1 圧縮強度測定値分布図

4.3 圧縮強度測定値の分類

4.2節で示したように、測定した橋梁毎に構造形式が異なるため、測定値は種別毎にばらつくことが考えられる。そこで、測定値を測定橋梁の上部形式別に分類するものとした。強度の違いを考慮した分類法として、まずコンクリート橋と鋼橋の2種類に大別できる。

次に上部形式であるが、鋼橋では表-4に示した示方書の変遷からもわかるように、合成と非合成で大きく強度の規定が異なる。さらに、プレストレスの場合は基準強度が30N/mm²以上と規定されていることから、この示方書の規定に基づき、測定橋梁を鋼橋の場合は合成と非合成に分類し、コンクリート橋の場合はRC構造とPC構造に分類するものとした。それぞれ分類した測定値のばらつきを表す統計値を表-5に示す。

表-4 適用示方書の変遷⁷⁾

年・月 (西暦)	道路橋示方書	床版コンクリート σ _{sk} (N/mm ²)
S14・2 (1939)	鋼道路橋設計示方書案	
S31・5 (1956)	鋼道路橋設計示方書	
S35・1 (1960)	鋼道路橋の合成桁設計	
S39・6 (1964)	鋼道路橋設計示方書	
S48・2 (1973)	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	非合成>21 合成>28 プレストレス>30
S55・2 (1980)	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	非合成>21 合成>27 プレストレス>30
H2・2 (1990)	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	同上
H6・2 (1994)	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	非合成>21 合成>27 プレストレス>30
H8・12 (1996)	道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編	同上

ここで、床版圧縮強度の測定を行った橋梁に関しては、その測定値から疲労予測を行うことが可能となるが、測定を行っていない橋梁についての予測は不可能である。また、北海道内に架設されている橋梁全てにおいて測定を行なう事も現実的ではない。そこで、本論では BMS への応用を目的とした予測手法を検討していることから、これらの測定結果を基に全ての橋梁を対象とした予測を行うために、構造形式毎に分類した4通りのデータそれぞれが表-5 に示した統計値を持つ正規分布であると仮定した。シュミットハンマーによる測定結果は、その測定値自体がある程度の誤差を含んでいることが考えられるため、その誤差や測定橋梁の構造上のばらつきを考慮するために、正規分布をとるものとする。実際に本測定から得られた圧縮強度測定値の頻度分布を図-2 に示す。同図は縦軸に測定値の頻度を、横軸に測定圧縮強度値をとっており、性質の異なるいくつかの分布が重なり合っていると思われる分布形状をしている。これは鋼橋とコンクリート橋、PC 床版といった複数の構造形式が混在しているためであると考えられる。また、比較として図-3 にコンクリート橋 PC 構造に分類される測定値のヒストグラムと測定値の結果から得た統計値による正規分布の確率密度を示す。同図から、測定値は正規分布に近い分布をとるものと推測でき、仮定の妥当性を裏付けている。そこで、本論では測定値を構造形式別に分類し得られた統計値や分布に基づき、それらを圧縮強度の取りうる範囲、つまり予測結果の範囲として用いるものとする。

表-5 測定値統計結果

	測定橋梁 全体	コンクリート橋		鋼橋	
		PC床版	RC床版	合成	非合成
平均値	28.6	31.8	29.9	27.5	24.5
標準偏差	3.9	2.5	3.7	3.4	2.0
最小値	18.9	22.8	21.7	18.9	21.3
最大値	35.7	35.7	33.8	34.4	26.7
標本数	250	85	34	91	11

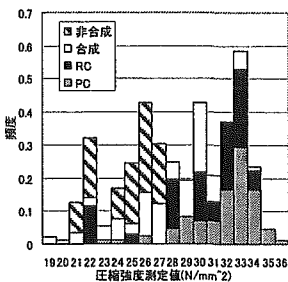


図-2 測定値頻度分布

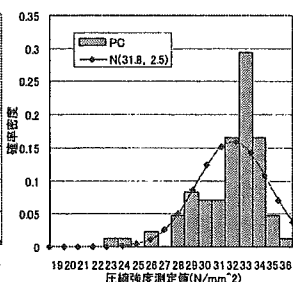


図-3 正規分布との比較

5. 劣化予測評価

5.1 疲労予測結果と点検ランクの関係

3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)⑧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。ここでは両者の劣化

度判定基準を同一にして比較するために、点検ランクと走行比の関係を図-4のように仮定した。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⑨に近似曲線をひいたものである。図中の破線は限界ひび割れ密度を 10m/m²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-6)から点検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点検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⑨

4章で示した床版圧縮強度の測定値を予測式に用いた予測結果と、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いる。また、本論で比較に用いる点検ランクは次の2種類のランクを用いている。

① 損傷平均ランク(damage-ave)

損傷が確認された部材のランクを総和したものを、その損傷部材(パネル)数で除し、平均化した指標

② 橋梁平均ランク(bridge-ave)

損傷の確認されなかった部材、つまり健全な部材にはランクとして5の値を与え、全ての部材のランクを総和したものを、対象橋梁の総部材数で除し、平均化した指標

これは、部材(パネル)毎の点検ランクのばらつきをなくし平均化するためである。また、点検は点検要領(案)に基づき実施されているが、点検を行う技術者は異なるために、点検を行った技術者の違いによる点検結果のばらつきが生じることも考えられる。そこで、そのばらつきを考慮するために、点検結果にもこの2種類のランクを用いることで範囲を与えている。

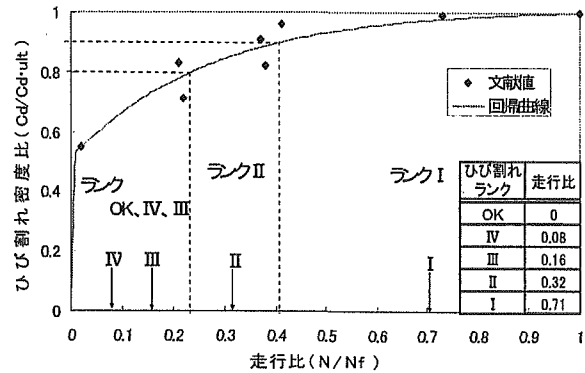


図-4 ひび割れ密度比と走行比および点検ランクの関係

表-6 点検要領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 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	-	

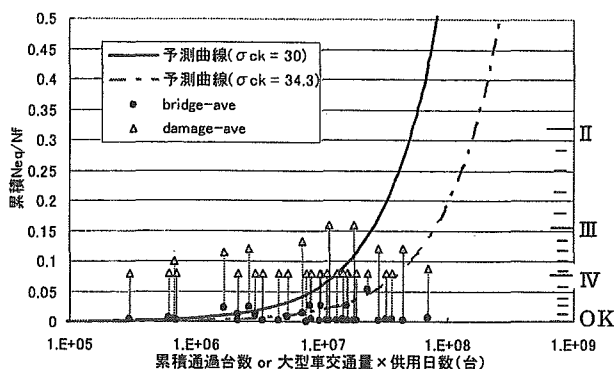


図-5 予測結果と点検データの比較例 (con 橋 PC 構造)

図-5 にコンクリート橋 PC 構造の疲労予測結果と点検ランクとの比較例を示す。同図の縦軸は疲労劣化度を示す累積 N_{cq} と N_f 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したグラフである。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している。図中の予測曲線は、予測の範囲として 2 種類記載している。 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の予測曲線は、表-4 より示方書の規定に基づいた場合の圧縮強度の最低ラインである。また、 $\sigma_{ck}=34.3\text{N/mm}^2$ の予測曲線はシュミットハンマーにより得た測定値の平均値 (表-5) に標準偏差を加えた値を用いている。点検データに関しては、明確な強度が規定された昭和 48 年以降の適用示方書により架設された PC 構造の橋梁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全てプロットした。その結果、点検ランクの範囲と予測の範囲は概ね合致しているものと思われる。しかし、一部の橋梁では、 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の予測曲線よりも危険側 (図中左側) にプロットされている。これは、疲労による劣化を促進させると考えられる水の影響¹⁰⁾を集中的に受けている場合や、海岸地域などに見られる塩害といった影響を複合的に受けたためではないかと推測される。そのため、劣化要因として疲労のみを考慮している本予測曲線よりも、劣化が進行している結果となったものと考えられる。

6. 結論

本研究では BMS に用いる道路橋床版の疲労劣化予測に松井式を用いて予測を行うとともに、予測式に必要な実測データの中で特に予測結果に大きな影響を及ぼす床版の圧縮強度をシュミットハンマーにより測定し、その結果を確率分布として予測式に反映させる予測手法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) これまでの予測では、モデル床版における標準的な圧縮強度を用いての予測を行ってきたが、実橋における床版圧縮強度の測定結果を基に、シュミットハンマー自体の精度や橋梁の構造上の問題から生じるばらつきを考慮した疲労劣化予測を行っていく必要があると考える。
- (2) 床版の圧縮強度値を測定することで、実橋における強度の確率分布を得ることができた。この分布を基に疲

労予測を行った結果、強度自体のばらつきが影響しているために、予測精度が向上したとは言えないが、確率分布に対する劣化の度合いを知ることができた。また、特に劣化の進行が顕著な橋梁においては、疲労以外の要因によるものや圧縮強度の低下といった要因が考えられる。

- (3) 道路橋床版のひび割れは疲労の影響が支配的であり、部材 (パネル) によって水の影響、塩害、積雪に関連した凍結防止剤などの要因が複合的に作用していることが考えられる。そのため、疲労以外の劣化要因が影響すると考えられる地域、架設条件においては、その劣化影響因子を考慮した予測を行う必要がある。

最後に今後の課題として、疲労予測式において重要な意味を持つ実測データ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。また、本論ではとりあげていない予測式の他のパラメータについても調査、検討を行い予測に応用することで、さらなる予測精度の向上に期待したい。

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 (本学客員教授) 松本正信氏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 17 年度日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号 7560418 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) 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.
- 3) 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, pp.1147-1155, 2005.
- 4) 松井繁之, 小島敬克, 島田功, 他 4 名: RC 床版の耐力と耐久性, 土木学会関西支部昭和 60 年度講習会テキスト「既存橋梁の耐力と耐久性」(委員長前田幸雄), pp.25-116, 1985.7
- 5) 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.
- 6) シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針 (案), 日本材料学会, 1958.
- 7) 多田宏行: 橋梁技術の変遷 道路保全技術者のために, 鹿島出版会, 2001.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.