

論文 北海道のコンクリート橋梁における判定区分を用いた劣化予測モデルについて

須藤 敦史*1・佐藤 京*2・兼清 泰明*3・丸山 取*4

要旨: 寒冷地における橋梁などのコンクリート構造物は、厳しい自然環境の中で長期の耐用年数を必要とするインフラストラクチャーであり、昨今の社会・経済状況等により予防保全に基づいた長寿命化を早急に図らなければならない。特に北海道は社会生活の基盤を道路に大きく依存しているため、道路橋梁において正確な劣化度の把握と将来予測は重要である。本研究では、北海道が建設・管理する道路橋梁の点検値を用いて確率・統計的な劣化予測モデルの提案を行っており、加えて判定された損傷度判定区分から現状の（平均的）劣化度の把握や分布特性の遷移予測の精度検討している。

キーワード: 確率過程, 劣化過程, 点検データ, 寒冷地構造物, コンクリート橋梁, ライフサイクルコスト

1. はじめに

北海道は本州の各地域より、都市間の交通や物流などの社会生活の基盤を道路に大きく依存している社会構造であり、昭和30年代後半からの経済成長にともなって、インフラストラクチャーの建設が推進されてきた。その中で橋梁や山岳トンネルなどの道路構造物は、長い耐用年数を必要とするものであり、昨今の社会情勢などから、これらの長寿命化を早急に図らなければならない。

しかし、北海道では自然や使用環境などの影響でインフラストラクチャーに対する劣化状況は厳しく、かつその特性はそれぞれの構造物で異なるため、劣化の状況および進行度などに大きなばらつきが生じている。

ここで、北海道が整備（建設・管理）している道道の道路橋梁は2015年現在、PC橋梁:2,668橋、RC橋梁:1,308橋、鋼橋梁:2,788橋、総数:6,764橋であり、各年のタイプ別橋梁建設数の推移を図-1に示す。

このような状況の下、平成25年度に国土交通省は道路構造物（橋梁・トンネル・コンクリート構造物・舗装など）に対してメンテナンスサイクルを基本とした維持管理手法の整備に着手し、平成26年度にはこれらの具体的な取組みとして監視および統一的な尺度による健全度の判定区分の設定および診断を実施¹⁾している。

しかし、橋梁を含めた道路構造物の点検で得られる健全度の判定区分は、レーティング（ランク）値で構成される場合が多いため、連続的な劣化評価を前提とするライフサイクルコスト（Life Cycle Cost : LCC）の概念（図-2参照）が適用しにくい^{2),3)}など。加えて、インフラストラクチャーの管理者は、次の段階として蓄積された点検データを活用して合理的かつ効率的な維持管理システム

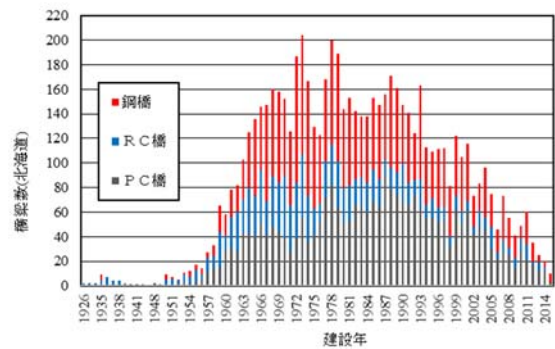


図-1 北海道が建設（管理）した道路橋梁の数

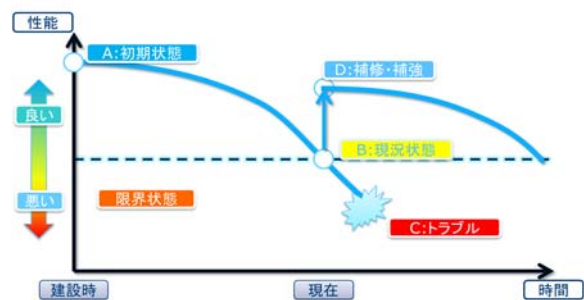


図-2 ライフサイクルコストの概念

の構築とその実行が求められるが、現状では点検データを有効に活用した劣化予測手法は開発されていないのが現状である⁴⁾。

そこで本研究は、北海道における道道のコンクリート橋梁に着目して、定期点検データを用いた確率・統計を基本として連続値より構成される劣化過程の同定・予測

*1 東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科教授 工博 (正会員)

*2 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造グループ

*3 関西大学 工学部 都市システム工学科

*4 東京都市大学 工学部 都市工学科

モデル⁵⁾の提案およびその適用性の検証を行い、さらに定期点検データから提案モデルにおける劣化評価値の同定（トレンド）とそれらの分布特性（ボラティリティなどの遷移）を求め、今後のコンクリート橋梁におけるライフサイクルコストを基本とした維持管理システムの構築に対する検討を行っている。

2. コンクリート橋梁の点検・評価⁵⁾など

2.1 道路橋梁の点検データ

国土交通省では2004年に橋梁定期点検要領(案)、2007年には道路橋に関する基礎データ収集要領(案)を策定し、道路橋梁に対する点検および維持管理を実施してきている。一方、北海道を含めた各地方自治体においても国が策定した要領等を基本とした点検要領を定めて橋梁点検および維持管理を実施してきている。

本研究では、北海道が2000年から2014年にかけて実施・記録した橋梁の定期点検結果における6,764橋(22,477径間)のデータのうち、コンクリート橋梁4,076橋(12,859径間)を用いて、後述する連続的な橋梁全体の健全度(劣化)指数を求めている。

2.2 損傷判定区分・評価および重み⁶⁾

北海道では、定期点検により橋梁の各部材を表-1に示すように良好な状態のランクOK(V)から交通確保に支障が生じる恐れのある状態のランクIまで5段階の損傷度判定区分(レイティング値)で分類している。本研究では後述する連続値に変換するため、この判定区分を判定評価値(OK=5, IV=4, III=3, II=2, I=1, 点検なし=0)と定めている。

ここで離散的な評価値を用いるマルコフ連鎖モデルにおける劣化過程では、良好な状態ランクok1から破損状態ランクnまでレイティング値(ランク)によって評価されるが、一般的なライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management: LCM)では、構造物の供用期間における保有性能の時間的遷移(劣化)と補修・補強との連続的な関係は、図-2のような連続値として示されている。さらに損傷や経年劣化などで保有性能・機能が、ある要求性能レベル以下(閾値の通過)となる時期を予測して、補修・補強によりその性能・機能を回復させて構造物の長寿命化を図って行くもの(予防保全)²⁾などであるため、本研究では定期点検で得られる損傷度判定区分(レイティング値)を連続的に遷移する健全度指数(1.0~0.0)に変換して取り扱っている。

一方、北海道が定めた道路橋梁の点検要領では、道路橋梁を上部工(主桁・2次(覆)部材・床版)、下部工(躯体・基礎)、その他(支承・高欄・地覆・舗装・伸縮装置など)20項目に分類し、各径間毎に構成部材の損傷種別

表-1 損傷度判定区分(レイティング値)

損傷ランク	一般的状況
I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となる恐れがある
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が必要
III	損傷が認められ、追加調査を行う必要がある
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある
OK(V)	点検結果から、損傷は認められない

表-2 点検部材の20項目(橋梁)

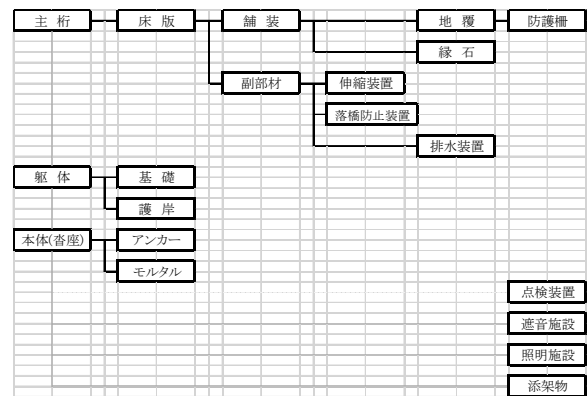


表-3 劣化評価に用いた10項目(橋梁)

部材	重み係数	部材	重み係数	
上部工	主桁	3.0	支承	2.0
	覆部材	1.0	伸縮装置	2.0
	床版	3.0	落橋防止装置	1.0
下部工	躯体	3.0	橋面工	1.0
	基礎工	3.0	付属部材	1.0

の判定結果が記録され、更にそれらに対して材質を考慮した損傷種類が32項目選定されている⁷⁾。

本研究においては表-2に示すように北海道のコンクリート橋梁における各部材の重要度や不具合リスクを参考にして各点検項目の重みを定め、橋梁全体の健全度指数を求める目的で、表-3に示すように上部工では主桁・2次(覆)部材・床版の3項目、下部工では躯体・基礎の2項目、その他からは支承・高欄・地覆・舗装・伸縮装置の5項目の計10項目を健全度指数の算定項目として選定している。

3. 点検データの数量化

定期点検データを用いた劣化の数量化は、Caltrans⁸⁾などやAASHTOの「PONTIS」⁹⁾などにおいて採用されている健

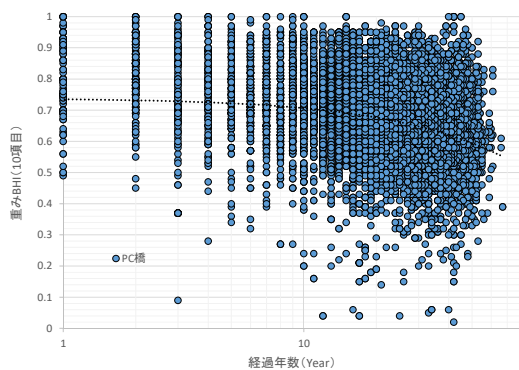


図-3 コンクリート(PC)橋梁のWBHI：北海道

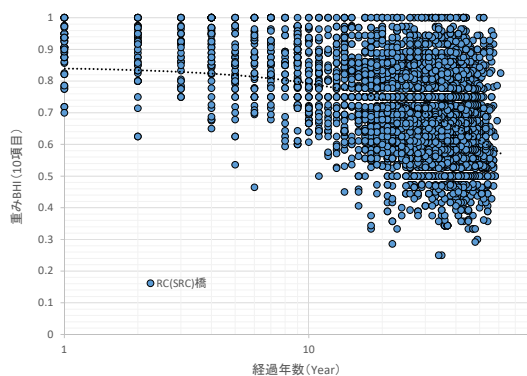


図-4 コンクリート(RC)橋梁のWBHI：北海道

全度指数を基本とした北海道BMS (Bridge Management System) における橋梁健全度指数 (Bridge Health Index : BHI) ^{10),11)}を採用し、橋梁の損傷度判定区分 (レイティング値) から橋梁部材の劣化健全度と重要性を考慮した重み係数を用いて重付きBHIへの変換を試みている。

具体的には、表-1に示した定期点検値より個々の部材 (主桁、床版、舗装など) の損傷判定区分 (5段階) より、それぞれの劣化ランクに応じた判定評価値と橋梁システムの重要度に応じた重み係数(Wf_i)を乗じて、重付き健全度指数 (Weighted Bridge Health Index : WBHI) を式(1)より求める。

$$WBHI = \sum_{i=1}^V (\text{部材}_i \text{健全度} \times Wf_i) / \text{供用初期点} \quad (1)$$

ここで損傷ランクに応じた判定評価値は、点検技術者へのアンケート調査¹²⁾などにより、損傷ランクごとに I =1.0, II=2.0, III=3.0, IV=4.0, OK(V)=5.0と定め、用いた橋梁の損傷リスクや重要性を考慮して求めた重み係数は表-3に示す。

ここで供用初期 (健全な状態) の点数で除しているた

めコンクリート橋梁の重付き健全度指数 (WBHI) は0.0 ~1.0の連続値をとり、健全な状態1.0から劣化の進行に従って0.0に向かっていく値になる。

4.コンクリート橋梁における劣化モデル

4.1 Kachanov (橋梁) モデル ¹³⁾

点検時刻 t におけるコンクリート橋梁の WBHI: $X(t)$ が取り得る連続値は区間 $[0,1]$ であるため、式(2)に示す劣化現象における経験論的な Kachanov モデルを用いて劣化評価値: $X(t)$ の平均的時間変動を記述する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (2)$$

β_0 : 劣化に関する平均進展抵抗値,

γ : 劣化に関する形状パラメータ

ここで式(2)がWBHIの区間 0.0~1.0 に理論上厳密におさまるようになるため、次式の補正関数 $g(x)$ を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)) \cdot g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (3)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (4)$$

ε は任意に小さくできる正の定数

これにより、破壊に至るまでの時間変化は式(2)と同じになる。

また、不規則な時間劣化を複合 Poisson 過程として駆動雑音 (自然災害などの大きな損傷 ¹⁴⁾など) とすると式(5)の確率微分方程式は以下となる。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (5)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (6)$$

$N(t)$ は Poisson 過程(強度パラメータ λ)、 $\{Y_k\}$ は同一の分布に従う独立な確率変数の集まりである。

ここで $\beta = \beta_0 - \lambda_{q_1}$ 、 λ 、 q_1 をパラメータとして点検データより最尤法で同定し、加えて同定に用いる点検データ期間を移動させることで重付き健全度指数(WBHI)の遷移予測が可能となる¹⁵⁾。

4.2 コンクリート (PC・RC) 橋梁の劣化過程

求めた北海道が管理する複数のコンクリート (PC・RC) 橋梁における WBHI の経時変化を図-3, 4に示す。

ここでPC橋梁 (図-3) では 8,731 径間,RC橋梁 (図-4) では 3,950 径間における損傷度判定区分より得られる判定評価値と重み係数より WBHI に変換した値である。

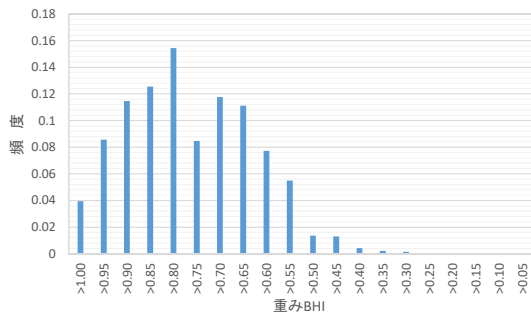


図-5 コンクリート(PC)橋梁におけるWBHIの分布

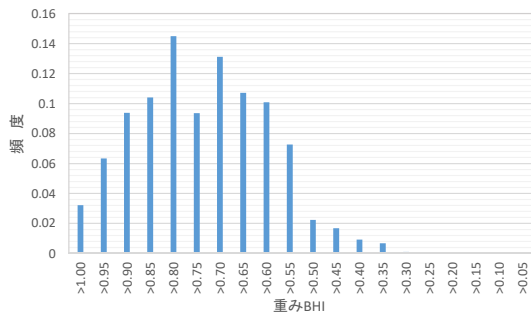


図-6 コンクリート(RC)橋梁におけるWBHIの分布

図-3, 4より、北海道が管理する道路橋梁の損傷度判定区分(レーティング値)から連続的な重付き損傷度指数(WBHI)への変換は可能であり、北海道における道路コンクリート橋梁の劣化に対する経時変化の全体的な特性を表している。ここで供用初期から劣化を示す橋梁が見られるが点検や数値変換時の誤差等の影響と考えられ、今後の検討・修正課題である。

したがって、点検方法や評価手法が若干異なる各自治体における様々な橋梁の定期点検データ(損傷判定区分などの離散値)から連続的な劣化度の評価値への変換が可能になり、LCCにより維持管理が推進されてゆくと考える。加えて国・自治体やNEXCO等の異なる道路事業者が管理している道路橋梁において一つの指標による健全度評価が成されることで、総合(統一)的な維持管理の向上につながると考えられる。

5. コンクリート橋梁における劣化の分布特性と予測

5.1 重付き健全度指数(WBHI)の分布特性

北海道が管理する複数のコンクリート(PC・RC)橋梁におけるWBHIの分布状況を図-5, 6に示す。ここでも同様にPC橋梁(図-5)は8,731径間, RC橋梁(図-4)は3,950径間におけるWBHIの分布状況を示している。

図-5, 6より、北海道が管理する道路コンクリート(PC・RC)橋梁における重付き健全度指数(WBHI)の

表-4(a) 供用期間ごとのWBHI分布特性：PC橋梁

供用期間		平均値	分散値
PC 橋梁(WBHI)	0~10年	0.89952	0.00661
	11~20年	0.82952	0.00976
	21~30年	0.77983	0.01069
	31~40年	0.74217	0.01077
	41~50年	0.73093	0.01277

表-4(b) 供用期間ごとのWBHI分布特性：RC橋梁

供用期間		平均値	分散値
RC 橋梁(WBHI)	0~10年	0.90327	0.00584
	11~20年	0.82098	0.00727
	21~30年	0.76781	0.01094
	31~40年	0.73627	0.01244
	41~50年	0.73004	0.01194

分布特性は、鋼橋梁や他の道路構造物(山岳トンネル¹⁶⁾やBox構造物¹⁷⁾などと同様におおむね対数正規分布(式(4)から理論的に導かれる)を示している。

ここでコンクリート橋梁において劣化分布の裾野部分は劣化が進行しており将来不具合が発生する確率が高いため、図-5, 6などは道路構造物に対する維持管理に対して非常に重要な情報である。

5.2 重付き健全度指数(WBHI)の劣化分布の遷移

次にコンクリート(PC・RC)橋梁における点検データから、供用期間ごとのWBHIの分布特性(平均値・分散値)の遷移(a:0~10年:平均5年, b:11~20年:平均15年, c:21~30年:平均25年, d:31~40年:平均35年, e:41~50年:平均45年)の結果を表-4(a), (b)に示す。

表-4(a), (b)に示すように、北海道のコンクリート(PC・RC)橋梁におけるWBHIの分布特性は、一様に平均値は供用期間に応じて劣化の進行を示しており、かつその分散値は広がる傾向を示している。

5.2 重付き健全度指数(WBHI)の分布特性の予測

次に、コンクリート(PC・RC)橋梁において求められたWBHI分布特性の供用期間(a:0~10年, b:11~20年, c:21~30年, d:31~40年, e:41~50年)ごとの平均値・分散値を基に、10年先(供用期間f:51~60年:平均55年)におけるWBHIの分布特性の予測を行う。

具体的にはコンクリート(PC・RC)橋梁の供用期間(a~e)においてWBHIの分布特性(平均値・分散値)に対して対数曲線で近似を実施する¹⁶⁾。

近似された対数曲線より供用期間（f:51～60年：平均55年）におけるWBHIの分布特性（平均値・分散値）の将来を予測して、実際の定期点検データより求めた供用期間（f:51～60年：平均55年）におけるWBHIの分布特性（平均値・分散値）と比較する。

(1) 対数曲線によるWBHIの分布特性の近似

PC・RC橋梁における供用期間（a:0～10年，b:11～20年，c:21～30年，d:31～40年，e:41～50年）の分布特性（平均値・分散値）を対数曲線で近似（平均値:実線・分散値:点線）したものを式(7)～(10)および図-7 (a), (b)に示す。

PC橋梁

$$\text{平均値 } y_1 = -0.0079\ln(x) + 1.0325 \quad (7)$$

$$\text{分散値 } y_2 = 0.0025\ln(x) + 0.0026 \quad (8)$$

RC橋梁

$$\text{平均値 } y_1 = -0.0083\ln(x) + 1.0383 \quad (9)$$

$$\text{分散値 } y_2 = 0.0030\ln(x) + 0.0011 \quad (10)$$

ここで y_1 ：平均値， y_2 ：分散値， x ：供用年数であり，図-7 (a), (b)に示したように非常に良い相関特性を示している。

(2) 対数曲線によるWBHIの分布特性の予測

次に得られた対数近似曲線より，PC・RC橋梁において供用年数55年（平均）におけるWBHIの分布特性（平均値・分散値）の予測，および実際の求められたWBHIの分布特性を表-5に示す。

表-5に示すように，WBHIの分布特性の予測が可能となり，これらコンクリート橋梁における実際の観測・点検データの劣化区分からそれらの劣化特性や分布特性（平均値や分散値）などの将来における分布特性の予測値が求められる。加えて個々の橋梁において複数回の点検データが得られれば，個々の橋梁における劣化遷移も求められる。

さらに，それらの予想値を用いたモンテカルロシミュレーションなどの予測解析が可能となるため，このことにより今後の寒冷地（北海道）におけるコンクリート橋梁に対して予防保全を前提としたLCMやLCCの精度向上が図られると考える。

ただし，本研究でWBHIの分布特性予測に用いた対数近似曲線には劣化現象等の理論的な根拠がないため，このことは今後の研究課題と考える。

6. 結論

本研究では，寒冷地（北海道）のコンクリート橋梁を対象として，それらの劣化特性を点検データから把握・評価する目的で損傷度判定区分（離散値）から判定評価値を定義してコンクリート橋梁のシステムを考慮した経過年数に対する劣化モデル（重付き健全度指数）を提案

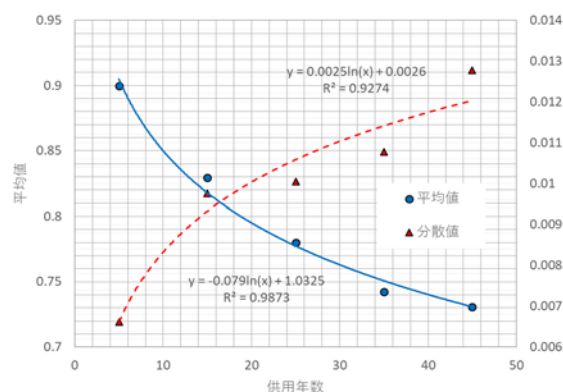


図-7(a) WBHI分布遷移（平均値・分散値）と対数回帰：PC橋梁

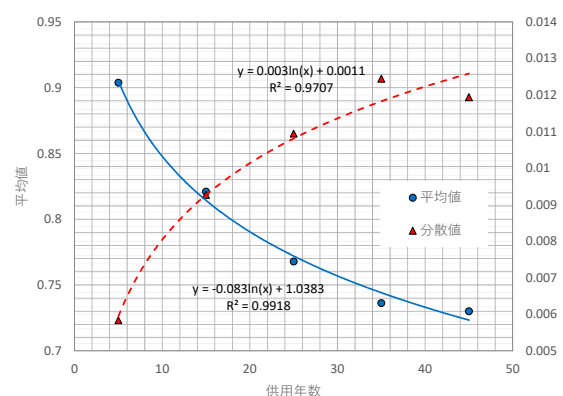


図-7(b) WBHI分布遷移（平均値・分散値）と対数回帰：RC橋梁

表-5 供用年数55年におけるWBHI分布特性の予測値と実測値（PC・RC橋梁）

供用年数55年		平均値	分散値
PC 橋梁	予測値	0.7159	0.0126
	実測値	0.6688	0.0195
RC 橋梁	予測値	0.7057	0.0131
	実測値	0.7131	0.0128

した。次に，そのWBHIを用いた劣化モデルでコンクリート橋梁の全体的な劣化を図示するとともにWBHIの分布特性（平均値：トレンド，分散値：ばらつき）の特性を実施に点検されたデータより検証した結果，以下の結論が得られた。

(1) 寒冷地（北海道）におけるコンクリート橋梁の定期点検データの損傷度判定区分（離散値）より，各部材の重要度などを考慮した連続値の劣化特性（重付き健全度指数:WBHI）が求められる。

加えてコンクリート橋梁におけるWBHIの分布は，山岳トンネルやBox構造物などと同様に対数正規分布を示し，かつ供用期間に応じて劣化は

進行する傾向が見られた。

- (2) WBHI 分布の裾野は劣化進行の方向へ広がるロング・ヘビィ・ファットテール化を示しており、加えてライフサイクルマネジメント:LCM(維持管理)において、劣化分布における裾野部分は将来不具合が発生する確率が高いため、これらの特性把握は維持管理を行う上で非常に重要な情報である。
- (3) 重付き健全度指数:WBHIは、確率・統計的な損傷度成長(Kachanov)モデルを用いることができ、その分布の平均値と分散値の時間的な推移過程を予測することで長期的な劣化分布の予測が可能となる。さらに予想値を用いた解析の実施が可能となるため、北海道におけるコンクリート橋梁に対して予防保全を前提としたLCMやLCCの精度向上が図られる。

今後、寒冷地(北海道)におけるコンクリート橋梁において、劣化の遷移やその分布傾向の詳細な把握や検討・評価は予防保全を前提とした維持管理には不可欠な情報であるが、地域特性や個々の橋梁さらに橋梁部材毎における劣化度や進展過程を正確に求めるためには、さらに多くのコンクリート橋梁における点検データの蓄積が必要であると考えられる。

最後に貴重な点検データの提供を頂いた北海道に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省(社会資本整備審議会道路分科会):道路の老朽化対策の本格的実施に関する提言,平成26年4月14日.
- 2) 社会インフラ維持管理・更新の課題についての対処戦略(案),(公社)土木学会,社会インフラ維持管理・更新検討タスクフォース,平成25年,3月.
- 3) 特集,インフラの状態評価と将来予測の最前線,土木学会誌,Vol.98,No.11,2013.
- 4) 杉本博之,阿部淳一:北海道のBMS体制と劣化予測曲線の更新について,平成18年度土木学会北海道支部論文報告集,第63号,A-3.
- 5) 須藤敦史,近野正彦,丸山収,佐藤京,西弘明:寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の同定と長期予測,土木学会論文集F1(トンネル工学),Vol.20, pp.61-68, 2010.
- 6) 須藤敦史,佐藤京,西弘明:積雪寒冷地トンネルにおけるTMS構築に関する研究,土木学会第21回トンネル工学研究発表会論文集,pp.203-208,2011.
- 7) 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.
- 8) Shepard, R. W. and Johnson, M. B.: California Bridge Health Index -IBMC-005, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 9) AASHTO: PONTIS User's Manual, Release 3.2, 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.53-65,2002.4.
- 11) 渡邊一悟,石川博之,佐藤京,加藤静雄,佐藤誠,大島俊之:北海道BMSの開発と本格運用に向けた課題,土木学会北海道支部論文報告集,第61号,2005.
- 12) 須藤敦史,近野正彦,丸山収,佐藤京,西弘明:寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の同定と長期予測,土木学会論文集F1(トンネル工学),Vol.20, pp.61-68, 2010.
- 13) Kachanov, R.: Rupture time under creep conditions, Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii.
- 14) Hiroaki Kanekiyo, Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh, Takashi Sato: A mixed Poisson model for random damage growth of tunnel concrete linings, 62nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.149-157,2013.
- 15) 須藤敦史,佐藤京,兼清泰明,丸山収,西弘明:寒冷地の道路構造物(橋梁・山岳トンネル)における劣化特性とその分布について,土木学会構造工学論文集,Vol.62A,pp.156-165,2016.
- 16) 須藤敦史,佐藤京,兼清泰明:点検データに基づいた寒冷地におけるコンクリート橋梁の劣化過程,日本コンクリート工学,年次論文集,Vol.39, No.2, pp.1285-1290, 2017.
- 17) 須藤敦史,兼清泰明,佐藤京,丸山収:ボックスカルバート構造物の不規則な劣化現象に対する確率モデルの提案,日本コンクリート工学,年次論文集,Vol.40, No.2,pp.1375-1380, 2018.