

論文 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

須藤 敦史^{*1}・佐藤 京^{*2}・兼清 泰明^{*3}

要旨：寒冷地（北海道）における橋梁や山岳トンネルなどの道路構造物は、厳しい自然環境の中で長期耐用年数を必要とするインフラストラクチャーであり、昨今の社会情勢などにより北海道では、これらの長寿命化を早急に図らなければならない。そこで本研究では、北海道におけるコンクリート橋梁の劣化特性を実際の点検データから連続値として把握し、さらに評価する目的で、それらの経過年数に対する劣化特性の動向、および分布のばらつきなどを確率モデルで検証している。

キーワード：確率過程、劣化過程、点検データ、寒冷地橋梁、ライフサイクルコスト

1. はじめに

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インフラストラクチャーであり、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、北海道において道路構造物などに対する劣化環境は厳しく、かつその特性はそれぞれ異なるため、劣化の状態に大きなばらつきが生じている。

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・舗装など）に対して、本格的なメンテナンスサイクルを回すための取組みに着手し、平成 26 年度にはこれらの具体的な取組みとして道路構造物を国の定める監視および統一的な尺度で健全度の判定区分による診断を実施している。

一方、橋梁点検における健全度の判定区分は、レイティング値（ランク）で成される場合が多いため、連続的な劣化評価を行うライフサイクルコストの概念が適用しにくい^{2),3)}など。

そこで本研究では、北海道（開発局・北海道）におけるコンクリート橋梁において、それぞれの劣化特性を実際の点検データから把握・評価する目的で、経過年数に対する連続値を有する劣化特性モデルを提案し、さらに観測データからモデルのパラメータを同定することで、劣化特性とそれらの分布（ばらつきなど）を求めて、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の向上に対する本手法の有用性検証を行っている。

2. 構造物における劣化過程⁴⁾など

2.1 確率論を基礎とした劣化過程

道路構造物における劣化推移（予測）は、一般的に図-1に示すように、(1)構造物群の平均的な劣化特性を対象とする確率・統計的手法、(2)個別の構造物における具体的な損傷・劣化現象を対象とする物理的方法に大別され

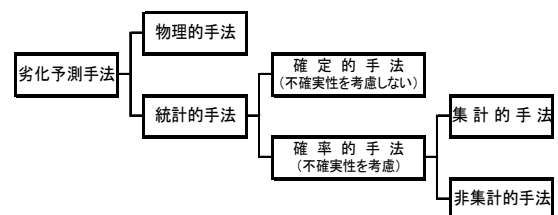


図-1 構造物の劣化予測手法

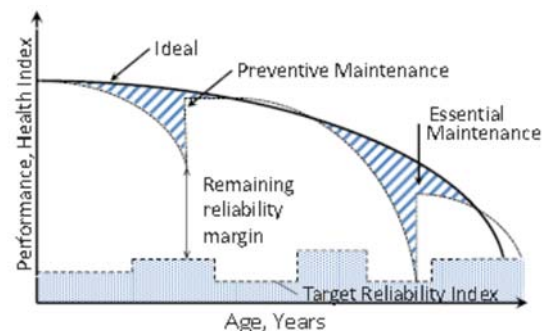


図-2 構造物の劣化（概念）

ている。

(2)では、物理的な劣化メカニズムを解明してモデル化する確定論的手法であり、(1)では膨大な点検・観測データから劣化現象過程を確率・統計的なモデル化をして表す手法である。さらに観測や点検データや劣化モデルにおけるモデル化誤差などの不確実性を考慮するか否かで分類される。

2.2 コンクリート橋梁における劣化過程⁵⁾

構造物の劣化過程における確率・統計論的モデルは、1)マルコフ過程（マルコフ連鎖モデル）、2)ポアソン過程、3)幾何学的ブラウン運動モデルが挙げられる。

マルコフ連鎖モデルにおいて劣化過程では、一般的な

^{*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

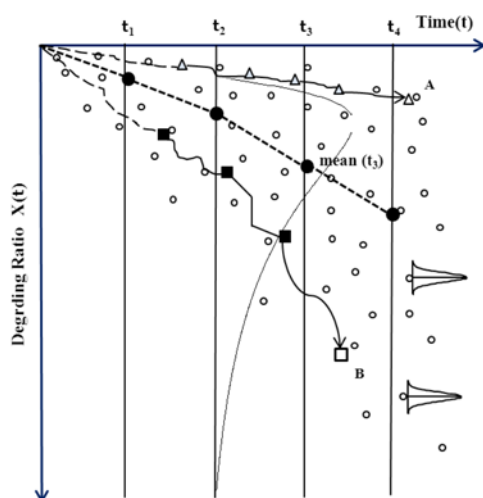


図-3 点検データと劣化サンプルパスの概念

構造物の点検で実施されているように、良好な状態ランク $ok!$ から破損状態ランク n までレーティング値（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のように示されており、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、本研究ではレーティング（離散）値を連続的に推移する評価値に変換して取り扱う。

道路構造物において観察や点検は、一般的にその劣化の程度により2～5年間隔で実施されており、図-3に示すように点検値（○）は点検間隔に応じた離散値で表される。ここでコンクリート橋梁などの個々の構造物における劣化過程は、その環境などにより動向が異なる劣化過程（サンプルパス、例えば△:橋梁A, ■:橋梁B）を示すものであり、加えてそれぞれの観察や点検値において観測・点検誤差（一般的には正規分布）は有しているもの、実現値として劣化過程はその環境などによって分布する値として扱うのが現実的である。

なお本研究では、劣化モデル導入の初期検討であるため、コンクリート橋梁の種別において、それぞれの劣化平均特性に対して同定・予測を行っている。

3. 点検データの数量化

道路構造物における橋梁の点検データは、旧建設省の点検要領(案)では点検箇所は20項目に区分されており、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

表-1 点検部材の項目（橋梁）

上部構造	主 桁
	2次部材
	床 板
下部構造	軀 体
	基 礎
その他	支 承
	高 欄
	地 覆
	舗 装
	伸縮装置

表-2 損傷ランク（評価）

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

定されている⁹⁾、ここでは橋梁全体における各部材の評価に対する重要度より、表-1に示す10項目を基本として選定し、橋梁の点検データの代表としている。

本研究ではコンクリート橋梁における点検データの数量化は北海道BMS（Bridge Management System）における健全度指数（Bridge Health Index : BHI）⁷⁾を採用し、また北海道が管理するコンクリート橋梁においても表-2に示すレーティング評価値（表-1を基本とした20項目）から簡易的にBHIへの変換を試みている。

ここでコンクリート橋梁の健全度指数は、Caltrans⁸⁾などやAASHTOの「PONTIS」⁹⁾などにおいて採用されている健全度指数（BHI）の基本式(1)を用いている。

$$BHI = \frac{\text{現在資産価値}}{\text{初期資産価値}} \quad (1)$$

初期資産価値 (TEV): 全ての部材が健全な状態 (建設当初) の橋梁全体の建設費

現在資産価値 (CEV): 現在 (部材に損傷を有する状態) の橋梁全体の建設費

具体的には、点検値より個々の部材（主桁、床版、舗装など）の損傷ランク（5段階）を求め、次にそれぞれのランクに応じた影響度 (Wf_i) を乗じて、以下に示す部材健全度 (Element Health Index : EHI) を求める¹⁰⁾。

$$EHI = \sum_{i=1}^v (\text{損傷ランク} i \text{ の総数} \times Wf_i) \quad (2)$$

ここで影響度 (Wf_i) は、点検技術者へのアンケート調査

11)などにより, 損傷ランクごとに $I=0.0$, $II=0.25$, $III=0.50$, $IV=0.75$, $OK(V)=1.0$ と定めた。

次に, 各部材ごとの現在資産価値 (Current Economical Value : CEV) と初期資産価値 (Total Economical Value : TEV) を式(3),(4)より求め, これらを式(1)に代入することにより健全度指数(BHI)が求められる。

$$CEV = \sum (\text{部材健全度} \times \text{部材数量} \times \text{部材単価}) \quad (3)$$

$$TEV = \sum (\text{部材数量} \times \text{部材単価}) \quad (4)$$

本来ならば資産価値によるBHIを用いなければならないが, 構造劣化のみ (BHI=EMI) としている。ここで橋梁健全度指数 (BHI) 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。図-4に北海道開発局が管理する複数の国道橋梁におけるコンクリート橋梁床版のBHIの経時変化を示す。

また,北海道が管理する橋梁における健全度指数 (BHI) においても,式(3),(4)による資産価値を求めていないため,以下では簡易BHIと記述する。

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¹²⁾

点検時刻 t におけるコンクリート橋梁の健全度指数 (BHI) $^5): X(t)$ が取り得る連続値は区間 $[0,1]$ であるため, 式(5)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。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (5)$$

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(5)がBHIの区間 0.0~1.0 に理論上厳密におさまるようにするため, 次式の補正関数 $g(x)$ を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)) \cdot g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (6)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (7)$$

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(5)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¹³⁾など) とすると式(6)の確率微分方程式は以下となる。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (8)$$

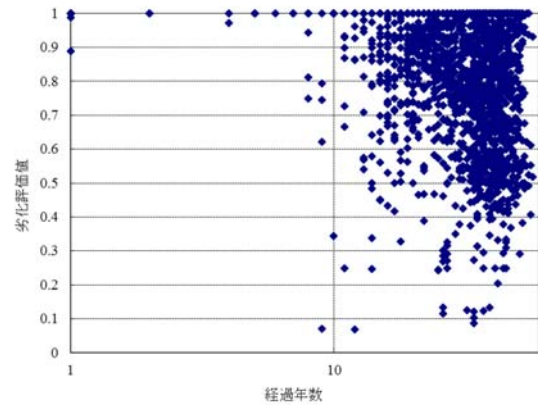


図-4 コンクリート橋梁 (床版) における BHI

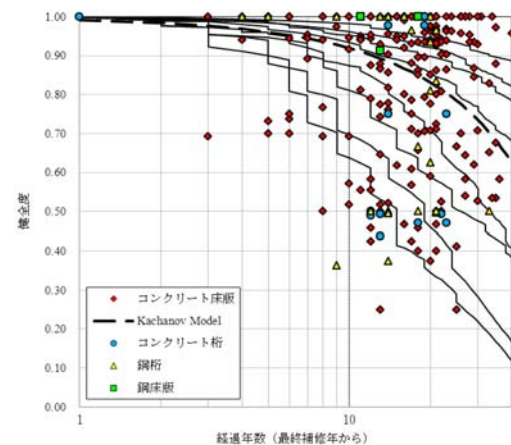


図-5 Kachanov モデルによる BHI の同定

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (9)$$

$N(t)$ 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。

ここでパラメータを $\beta = \beta_0 - \lambda_{q_1}, \lambda, q_1$ をパラメータとして点検データより求められとして点検データより最尤法で同定し, 同定したパラメータより健全度指数(BHI)の推移を推定する。

4.2 コンクリート橋梁 (床版) の劣化過程 : 開発局

複合 Poisson 過程を駆動雑音 (各ジャンプ) の期待値を $q_1 = E\{Y_k\} (k=1,2,\dots)$ とし, $\beta = \beta_0 - \lambda_{q_1}, \lambda, q_1$ をパラメータとして点検データより求められたコンクリート床版の健全度指数 (BHI) から $\beta_0 = 4.0 \times 10^{-3}$, $\lambda = 0.5$, $q_1 = 8.0 \times 10^{-3}$ の同定値 (本研究では最尤法を採用しており, 詳細は文献 14) など参照) が得られた。

ここで提案した劣化 (Kachanov) モデルよりコンクリート橋梁床版 (国道における 3,945 橋より抽出) の健全

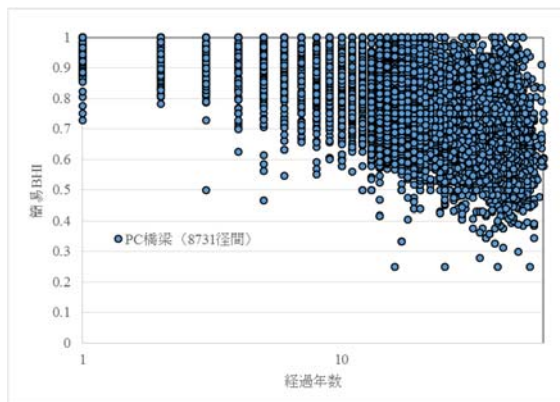


図-6 コンクリート(PC)橋梁の簡易BHI：北海道

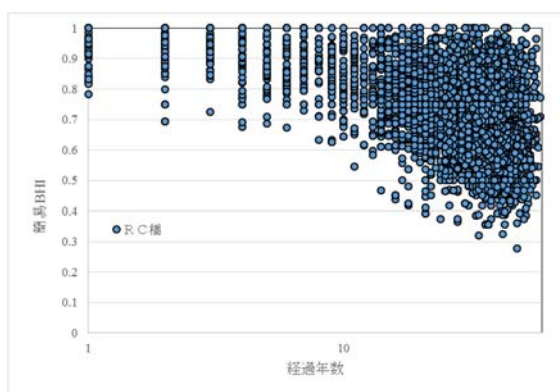


図-7 コンクリート(RC)橋梁の簡易 BHI：北海道

度指数(BHI)の平均劣化の同定値(破線)と、実際の点検データから得られる各部の健全度指数 BHI(◇:コンクリート床版, ○:コンクリート桁, △:鋼桁, □:鋼床版)を図-5に示す。

また、同時に同定されたパラメータを用いてモンテカルロ法より求めた劣化過程のサンプルパスの一部(8本)を細実線に示す。

ここで図-5より、破線は平均的な健全度指数(BHI)の劣化過程(平均)を表していることより、基本的に提案(Kachanov)モデルによるコンクリート橋梁の劣化過程(BHI)の表現は可能である。

加えて、モンテカルロ法などによる破壊確率の算定や損傷時期の予測が可能となるため、合理的な予防保全が行える¹⁵⁾。

4.3 コンクリート橋梁の劣化過程：北海道

次に、北海道が管理する複数のコンクリート(PCとRC)橋梁における簡易BHIの経時変化を図-6, 7に示す。ここでPC橋梁(図-6)では8,731径間、RC橋梁(図-7)では3,950径間の点検データ(レーティング値)を簡易BHIに変換した値を用いている。

図-6, 7より、開発局が管理する橋梁と同様に北海道

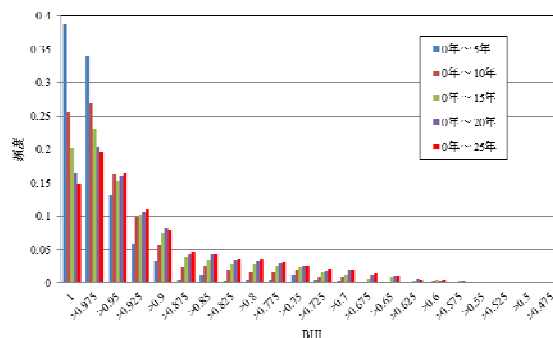


図-8 経年ごとの橋梁における劣化(BHI)分布

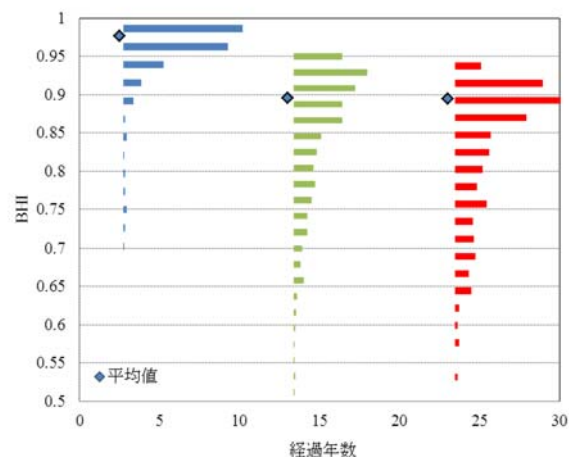


図-9 橋梁の経過年数における平均BHIと分布

表-3 橋梁の経過年数におけるBHIの平均と分散

供用期間		平均値	分散値
橋梁 (BHI)	0～5年	0.9761	0.04653
	6～10年	0.93239	0.08262
	11～15年	0.89548	0.1046
	16～20年	0.89595	0.09872
	21～25年	0.89457	0.09902
	26～30年	0.88678	0.10926

などの自治体が管理する橋梁点検データ(レーティング値)から簡易BHI(統一的な連続評価値)への変換は可能である。このことは、点検方法や評価手法が若干異なる橋梁の点検データにおいても総合的な劣化評価が可能になることを意味しており、道路構造物の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分布

5.1 健全度指数(BHI)の分布：開発局

北海道内における開発局が管理している国道の3,945橋(鋼橋・コンクリート橋)の点検データから、供用期間ごとの健全度指数(BHI)の分布推移(①0

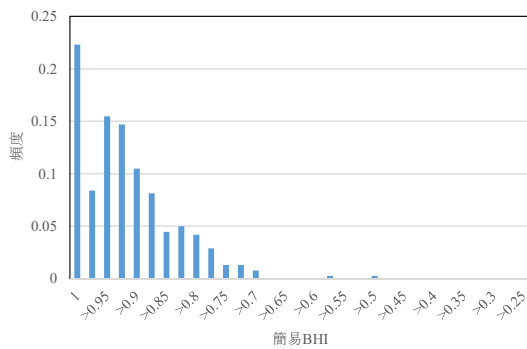


図-10(a) PC橋梁の簡易BHI分布：供用0～5年

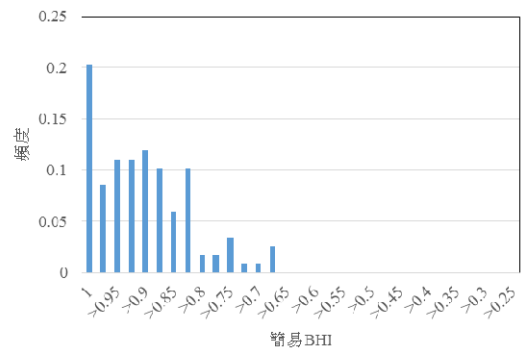


図-11(a) RC橋梁の簡易BHI分布：供用0～5年

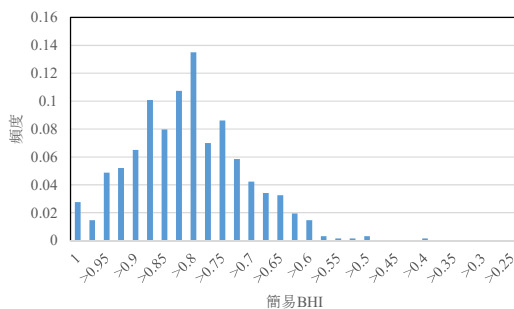


図-10(b) PC橋梁の簡易BHI分布：供用11～15年

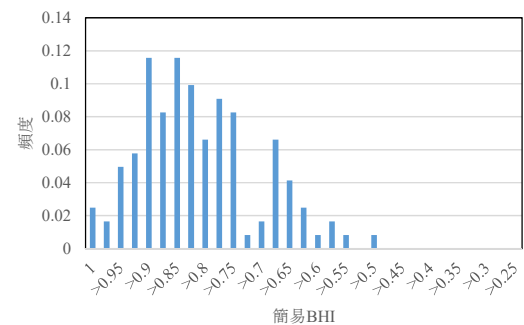


図-11(b) RC橋梁の簡易BHI分布：供用11～15年

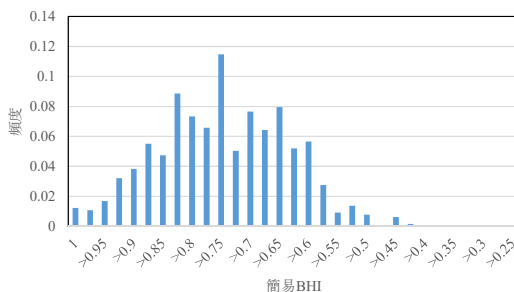


図-10(c) PC橋梁の簡易BHI分布：供用21～25年

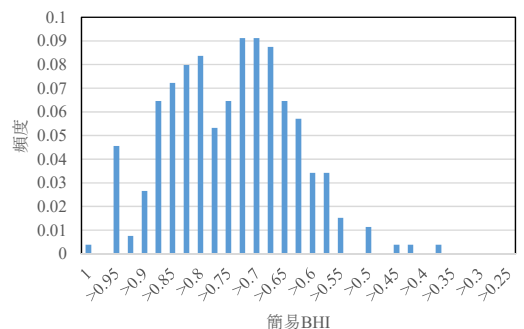


図-11(c) RC橋梁の簡易BHI分布：供用21～25年

～5年：平均2.5年，6～10年，②11～15年：平均12.5年，16～20年，③21～25年：平均22.5年）の結果を図-8，表-3に示す。

図-8より，国道の橋梁における健全度指数（BHI）はおおむね対数正規分布が供用年数とともに進行していると言え，表-3に示すようにBHIの対数正規分布における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。

次に，平均供用期間（①2.5年，②12.5年，③22.5年）ごとの健全度指数（BHI）の平均値とその期間の分布を図-9に示す。図-9より，国道の橋梁における健全度指数の分布は供用期間にともない裾野は劣化が進行した方向に広がり，かつ度数も増加するロングテール・ヘビィテール化も見られる。

ここで道路構造物のLCM（維持管理）において，構造物における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-8，9などにおける裾野部分は維持管理に対して非常に重要な情報であると言える。

5.2 橋梁における健全度指数（BHI）の分布：北海道

北海道が管理している道道のPC橋における点検データから，供用期間ごとの健全度指数（簡易BHI）の分布推移（平均供用期間：①2.5年，②12.5年，③22.5年）ごとの結果を図-10(a)～(c)に示す。

さらに道道のRC橋における点検データから，供用期間ごとの健全度指数（簡易BHI）の分布推移（平均供用期間：①2.5年，②12.5年，③22.5年）ごとの結果を図-11(a)～(c)に示す。

図-10, 11 (a)～(c)より, 道道のコンクリート橋梁における簡易BHIの分布は, 国道の橋梁と同様に供用期間にともない裾野は劣化が進行した方向に広がり, かつ度数も増加するロングテール・ヘビィテール化も見られる。ここで実際に得られている開発局および北海道における橋梁の点検データより, コンクリート橋梁の健全度指数 (BHI) の分布傾向を考察した結果, いずれも対数正規分布を示し, 供用期間に応じて平均劣化は進行する傾向を示している。さらにその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いる。

6. 結 論

本研究は, 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・評価する目的で経過年数に対する劣化モデルを提案し, モデルのパラメータ同定を行うとともに, それぞれの劣化評価を連続的に行い, 同時にそれらのばらつき状態の傾向・変化も点検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劣化特性 (健全度指数:BHIもしくは簡易BHI) は, 確率・統計的な損傷度成長 (Kachanov) モデルを用いることにより表すことができ, その分布の平均と分散の時間的な推移過程を推定することで長期的な劣化予測が可能となる。
- (2) 寒冷地 (北海道) におけるコンクリート橋梁の劣化評価値 (BHI) は国道の橋梁および道道の橋梁とも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。
- (3) 劣化評価値の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, 劣化分布の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非常に重要な管理情報である。
- (4) 今後, 寒冷地 (北海道) におけるコンクリート橋梁において, 劣化の推移やその分布傾向の詳細な把握や検討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, まだ多くの点検データの蓄積が必要であると考えられる。

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) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 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) 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。
- 11) 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。
- 12) Kachanov, R.: Rupture time under creep conditions, Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii。
- 13) 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。
- 14) Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh, Hiroaki Tanaka, Takashi Sato, Hiroaki Nishi: A Stochastic Model for Deterioration Process of Tunnel Lining Concrete in Cold Regions, The 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, (ICOSSAR'13), pp.5115-5120, 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。