論文　寒冷地のコンクリート構造物（ボックスカルバート）における不規則な劣化現象に対する確率モデルの提案

須藤　敦史[*1]・佐藤　京[*2]・兼清　泰明[*3]・丸山　収[*4]

要旨：寒冷地（北海道）における橋梁・トンネル・コンクリート構造物などの社会インフラ施設は，厳しい自然環境の中で長期耐用年数を必要とする構造物であるが，昨今の社会・経済情勢などにより，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，北海道における国道および道道のボックスカルバートに対して，それらの不規則な劣化状態（サンプルパス）を確率（ブラウン運動）モデルで記述し，実測値を基に経過年数に対する劣化動向および分布やばらつきなどを検証している。

キーワード：確率劣化過程，点検データ，寒冷地コンクリート構造物，ボックスカルバート

1. はじめに

寒冷地である北海道の社会インフラ施設は，長い耐用年数を必要とする道路構造物であるが，昨今の社会・経済情勢などより，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，寒冷地特有の劣化要因を考慮しながら，限られた予算の中で多くの道路構造物に対してライフ・サイクル・コスト(Life Cycle Cost : LCC)の最適化を図るマネジメントシステムの構築と運営が急務となっている[1)など]。

このような状況の下，平成25年度には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，本格的なメンテナンスサイクルを適用するための取組みに着手しており，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・観察および統一的な尺度で健全度の評価・診断を実施[2)]している。

しかし，橋梁やトンネルなどの主要な道路構造物においては点検・観測データに基づいた劣化評価は実施されているが，その他ボックスカルバートなどのコンクリート構造物に対する劣化診断や評価などは進んでおらず，かつ国や自治体など管理者が異なるコンクリート(道路)構造物に対して健全度の同一の評価が為されていないのが現状である。

そこで本研究では，寒冷地の北海道において管理者が異なり（国・北海道），橋梁やトンネル以外の道路コンクリート構造物（ボックスカルバート:**写真-1** 参照）に対し，それぞれの不規則な劣化特性を把握・評価する目的で経過年数に対する確率・統計的な劣化特性モデルを提案している。

さらに実際の観測・点検データから劣化特性やそれらの分布（ばらつきなど）を求めて，今後の道路構造物におけるコンクリート構造物に対する LCC 向上への基本検討を行っている。

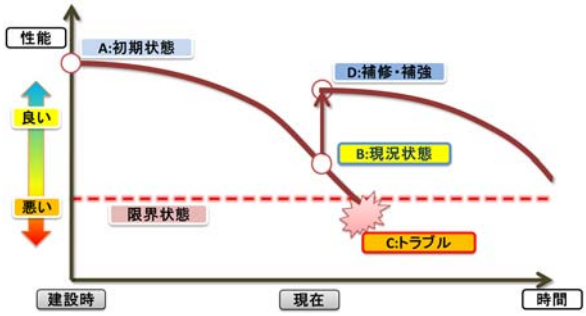


図-1　道路構造物における LCM の概念

写真-1　道路構造物におけるボックスカルバート

2. コンクリート構造物（ボックスカルバート）の劣化過程[3)など]

2.1 確率論を基礎とした劣化過程の考え方

道路構造物などの社会インフラ施設における劣化遷移（予測）は,一般的に(1)構造物群の平均的な劣化特性を

*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

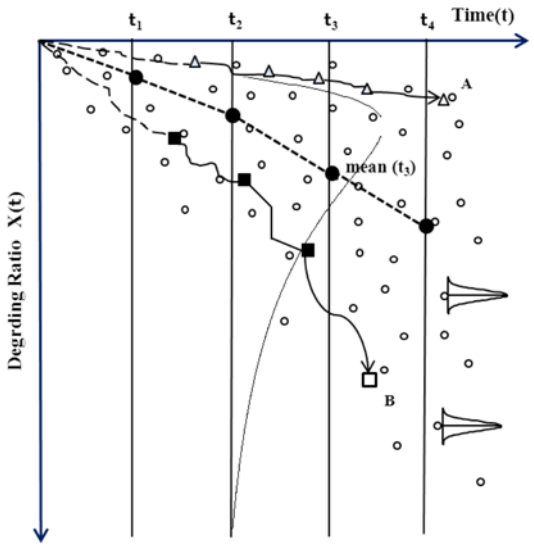


図-2　点検データと劣化サンプルパスの概念

対象とする確率・統計的手法と(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ている。ここで(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を確率・統計的なモデルで表現する手法である。

さらに観察・点検データの観測誤差や劣化モデルの誤差などの不確定性を考慮するか否か，離散的な健全度で評価するか，連続的な値で評価するかで評価手法は分かれている。

2.2 ボックスカルバートの劣化過程

社会インフラ施設の劣化過程に対する確率・統計論を基本としたモデルは，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は，一般的な道路構造物の点検・観察では，**表-１**に示すように良好な状態ランクⅠから破損状態ランクⅤまでのレイティング値（離散値によるランク）による評価が多いが，ライフ・サイクル・マネジメント（Life Cycle Management : LCM）では，道路構造物の供用期間に対する保有性能の時間的遷移（劣化）と補修・補強との関係を，**図-1** に示すように連続量として考えているのが基本である。

さらに LCM は，損傷や経年劣化などで構造物の保有性能・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，不具合発生前に補修・補強を実施することで，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予防保全[2)など]をトータルで実施する。

そこで本研究では，ボックスカルバートにおける離散的な（レイティング値）点検・評価データを連続的に遷移する評価値に変換して劣化特性やその遷移・分布などをブラウン運動モデルにより議論する。

一般的に社会インフラ施設における観察や点検は，その劣化の程度により 2～5 年間隔で実施されるのが原則であり，その劣化遷移（挙動）は，**図-２**に示すように点検間隔に応じた点検値（○）が表されるが，本来は連続的な挙動を示すものである。

本研究で対象とするボックスカルバートなどのコンクリート構造物の劣化挙動においても，その気象・施工・使用環境などの影響により，個々の異なる連続的な劣化過程（図中の例えばボックスカルバート A ではサンプルパス:-△-△-，また別のボックスカルバート B ではサンプルパス:-■-■- ）を示し，またそれぞれの観測・点検値には人為・偶然誤差（一般的には正規分布）などを含んではいるもの，実現値としてはそれぞれのボックスカルバートにおける劣化過程（挙動）を示していると考える。ここで，同じ構造特性（ボックスカルバート）においてはその平均的な劣化特性の把握を考えるのが現実的であるため，本研究では，北海道開発局と北海道など管理者が異なるボックスカルバート構造物において供用年数に対する劣化特性の平均値（●）とその分布に対しての挙動を把握（同定）し，同時にそれらの将来の劣化予測を試みている。

3. 観察・点検データの数量化

ボックスカルバートなどコンクリート構造物における劣化評価（点検）項目は，旧建設省の点検要領(案)では橋梁点検と同様に点検箇所は**表－２（a）**に示す10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として32項目が開発局では選定されている[6)]。

ここではボックスカルバートにおける各部材の評価に対する重要度などにより，**表－２（b）**に示す20項目を基本として選定し，ボックスカルバートに対しての離散観察・点検データ（レイティング評価値）としている。

また本研究ではボックスカルバートの点検データの数量化においても寒地土木研究所において提案された BMS（Bridge Management System）の健全度指数（Bridge Health Index : BHI）[7)]を基本的に採用し，また北海道が管理するボックスカルバートにおいても**表－１**を基本とした20項目に該当するものに対して，**表－２**に示すレイティング評価値から以下に示す式を用いて簡易BHIへの変換を試みている。

寒地土木研究所で整備されているBMSにおける健全度指数は，Caltrans[8)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。

表-1　損傷ランク（評価値：北海道）

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(a)　道路構造物（橋梁）の点検項目

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

表-2(b)　ボックスカルバートの点検項目

No.	点検項目1	No.	点検項目2
1	主　桁	11	舗　装
2	副部材	12	地　覆
3	床　版	13	縁　石
4	躯　体	14	防護柵
5	基　礎	15	護　岸
6	本　体	16	排水装置
7	ﾓﾙﾀﾙ	17	点検施設
8	ｱﾝｶｰ	18	遮音壁
9	伸縮装置	19	照明装置
10	落橋防止	20	添架物

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

初期資産価値:全てが健全な状態(建設当初)の構造物全体の建設費

現在資産価値:現在(損傷を有する状態)の構造物全体の価値

本来ならば資産価値を考慮したBHIを用いるのが合理的であるが，本研究では構造物に対する劣化評価項目のみを対象としている。

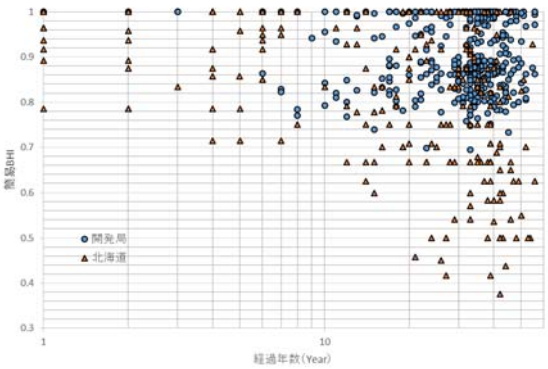


図-3　ボックスカルバートの簡易 BHI（経時変化）

具体的には，それぞれのボックスカルバートに対する各観察・点検項目の損傷ランク（5段階）から，それぞれのランクに応じた影響度(Wf_i)を乗じて，以下に示す簡易BHIを求める[10]。

$$\text{簡易}BHI = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\text{損傷ランク}i\text{の総数} \times Wf_i) \quad (2)$$

ここで影響度:Wf_iは，点検の実務に携わっている技術者へのアンケート調査[11)など]により，損傷ランクごとの点数化はⅠ=0.0，Ⅱ=0.25，Ⅲ=0.50，Ⅳ=0.75，OK(Ⅴ)=1.0，N=項目数（6～20項目）と定めている。

簡易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に近づいていく値となる。

ここで北海道開発局（379か所）と北海道（236か所）がそれぞれ管理する道路構造物のボックスカルバートにおいて提案方法で求めた簡易BHIの経時変化を**図-３**に示す。

4.ボックスカルバートに対する確率・統計劣化モデル

4.1 Kachanov 劣化モデル [12)]

点検時刻 t におけるボックスカルバートに対する健全度指数（BHI）[5)]が取り得る連続値は区間 [0.0～1.0] であるため，式(3)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(簡易 BHI):$X(t)$ の平均的時間変動を記述する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (3)$$

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(3)が簡易 BHI の劣化指数の区間 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。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)), g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (4)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \le x \le 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (5)$$

ε は任意に小さくできる正の定数

これにより，不具合や破壊に至るまでの時間変化は式(3)と同様となる。

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),14)] など）とすると確率微分方程式は以下となる。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t)) \quad (6)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (7)$$

$N(t)$ は Poisson 過程(強度パラメーター λ)，$\{Y_k\}$ は同一の分布に従う独立な確率変数（自然災害）の集まりである。したがって $\beta = \beta_0 - \lambda_{q1}, \lambda, q_1$ をパラメータとすれば，得られている点検データよりパラメータを同定することで求められる。

本研究では実際の点検データより最尤法でパラメータ同定し，同定したパラメータより簡易BHIの将来予測を実施している。

4.2 ボックスカルバートにおける平均的な劣化過程

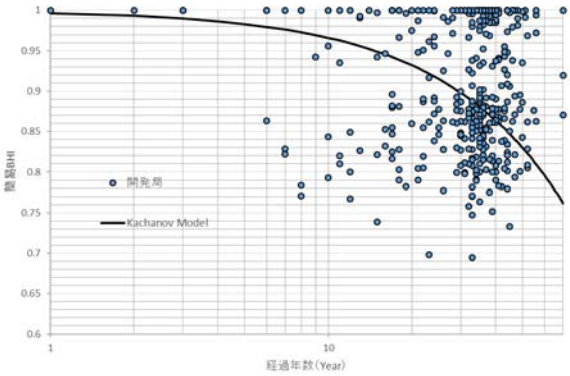
北海道開発局（379か所）および北海道（236か所）が管理する道路構造物におけるボックスカルバートの定期点検データからKachanovモデルの遷移（簡易BHIにおける平均値）を**図−４(a)**，(b) に示す。

具体的には最尤法を用いて定期点検データによりKachanovモデルのパラメータを同定し，同定したパラメータよりボックスカルバートの平均的な劣化遷移・過程（簡易BHIのトレンド成分，開発局:実線，北海道:破線）を描いている。

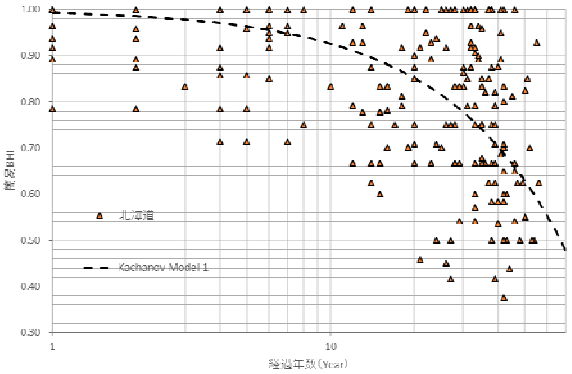
ここで**図−４(a)**，(b) より，北海道開発局（実線）と北海道（破線）ともにボックスカルバートにおける平均的な劣化遷移・過程を表していることより，橋梁と同様に基本的に提案（Kachanov）モデルによるボックスカルバートなどのコンクリート構造物の劣化遷移・過程の記述が可能となる。

加えて，**図−４(a)**，(b) より，北海道開発局（国）や北海道などの自治体が管理する道路構造観察・点検データ（レイティング値）から簡易 BHI（統一的な連続評価値）への変換は可能であり，それらの平均的な劣化遷移・過程の把握が可能となる。

このことは，点検方法や評価手法が若干異なる道路構造物の観察・点検データにおいても異なる管理者における劣化診断・評価が可能になることを意味しており，道路構造物の総合的な LCM もしくは維持管理の向上につながると考えられる。



図−4(a) Kachanovモデルにおける劣化遷移：開発局



図−4(b) Kachanovモデルにおける劣化遷移：北海道

5. ボックスカルバートにおける劣化の分布

5.1 劣化評価値（簡易BHI）の分布

同様に北海道開発局（379か所）および北海道（236か所）が管理する道路構造物におけるボックスカルバートの点検データから，供用期間ごとの劣化分布に当たる簡易健全度指数（簡易BHI）の分布状況（①0～15年:平均7.5年，②0～30年:平均15年，③0～45年:平均22.5年，④開発局 0～70年:平均35年，北海道0～56年:平均28年）を**図−５(a)**，(b)，および**表−３**に示す。

図−５(a)，(b) より，北海道開発局および北海道が管理する道路構造物におけるボックスカルバートの簡易健全度指数（簡易 BHI）は，橋梁の劣化指数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）を示しており [3)]，加えて供用年数とともに劣化（平均値減少）およびばらつき（分散値増加）が進行している。

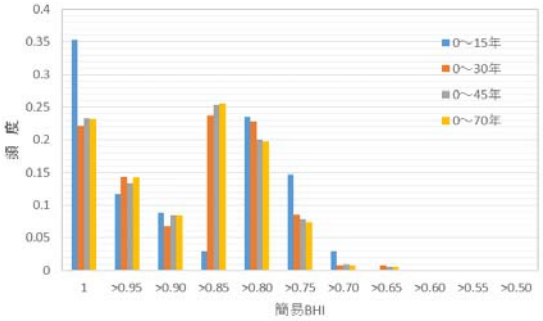


図-5(a) 供用期間ごとの簡易BHI分布：開発局

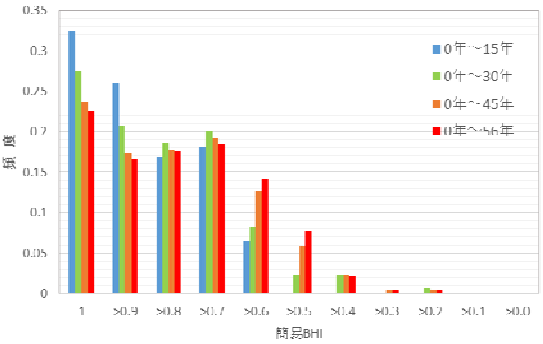


図-5(b) 供用期間ごとの簡易BHI分布：北海道

ここで北海道開発局および北海道が管理する道路構造物におけるボックスカルバートの簡易 BHI 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・ヘビィテール化が見られるが，ボックスカルバート構造物では橋梁や山岳トンネルほど顕著ではない[3),15)など]。

ここで，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**（a），（b）に示す分布の裾野部分は道路構造物におけるコンクリート構造物に対するLCM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 ボックスカルバートにおける劣化遷移の予測

前節で求めた簡易BHIの対数正規分布における平均値および分散値は供用期間に応じて劣化進行を示しており，かつその平均値は一様の減少し，分散値は広がる傾向（双方とも劣化進行）を示している。

ここで北海道が管理している道道のボックスカルバートにおける観察・点検データから求めた，供用期間ごとの劣化（簡易BHI）分布推移（平均供用期間:①7.5年,②15年,③22.5年,④28年）における平均値と分散値を**表－３**，**図－６**に示す。

表－３，**図－６**より，北海道が管理している道道のボックスカルバートにおける劣化評価値（簡易BHI）の分布は，橋梁と同様に供用期間にともない一様に進行し，かつ裾野は劣化が進行した方向に広がる傾向を示している[16)]。

表-3 ボックスカルバート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
ボックスカルバート(簡易BHI)	0～15年	0.8964	0.01195
	0～30年	0.8535	0.02217
	0～45年	0.824	0.02595
	0～56年	0.8143	0.02719

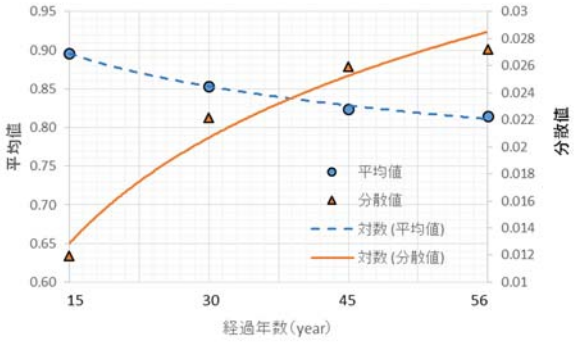


図-6 経年ごとの分布遷移（平均値・分散値）：北海道

図－６では，北海道が管理するボックスカルバートに対する簡易BHIの分布（平均値:破線，分散値:実線）の経時変化を対数曲線により外挿的に求めている。

したがって，これらボックスカルバートにおける実際の観測・点検データから劣化特性やそれらの分布の平均値やそのばらつき（分散値）などに対する将来の予測値が求められ，予想値によるモンテカルロ解析が実施できるため，今後の道路構造物におけるコンクリート構造物に対する予防保全を前提としたLCMやLCCの向上が可能となると言える。

6. 結 論

本研究は，寒冷地（北海道）における道路構造物のボックスカルバートを対象として，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確率・統計論による劣化モデルを提案し，その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量により行い，同時にそれらのばらつき状態の傾向・変化も観察・点検データを基に検証した結果，以下の結論が得られた.

(1) 北海道（開発局，北海道）における道路構造物であるボックスカルバートの劣化特性（健全度指数:

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記述することができ，その分布の平均値と分散値の時間遷移・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) 北海道（開発局，北海道）における道路構造物であるボックスカルバートの寒冷地（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，それぞれの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，これらの特性把握および将来予測は非常に重要な管理情報である。

今後の課題として，北海道（開発局，北海道）における道路（コンクリート）構造物であるボックスカルバートにおいて，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，まだ多くの観察・点検データの蓄積が必要と考える。

参考文献

1) 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.
2) 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.
3) 須藤敦史，佐藤京，兼清泰：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，コンクリート工学会年次論文集，Vol.39，No.2，pp.1285-1289，2017.
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) 渡邉一悟，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) 兼清泰明，丸山収，須藤敦史，佐藤京：寒冷地トンネル覆工コンクリートの損傷度確率分布のテイル特性に関する考察，日本材料学会論文集， Vol.65, No.4, pp.275-281, 2016.
16) 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.