

橋梁点検データによる劣化予測に関する一考察

A study on the statistical deterioration prediction based on inspection data

小川福嗣, 近田康夫*

Fukutsugu Ogawa, Yasuo Chikata

*工博 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

In this study, the deterioration prediction analysis is made by using the soundness evaluation value of each member in the inspection data that has been recorded in Ishikawa Prefecture. Because the inspection results contain inappropriate data for using in deterioration prediction, it is necessary to select data. A method is shown to identify the period in the deterioration progress and select the data to be used in the deterioration prediction by applying the piecewise linear regression. Many research and practical trials related to deterioration prediction by using the Markov deterioration hazard model are reported. Based on the current stored data, the deterioration prediction of Markov deterioration hazard model is compared with that of regression model.

Key Words: Bridge Management System(BMS), bridge inspection data, deterioration curve

キーワード: 橋梁維持管理システム (BMS), 橋梁点検データ, 劣化曲線

1. 研究の背景

高度成長期を中心に集中的に整備されてきた橋梁が今後急速に老朽化し維持管理費用の増大が見込まれることから、予防保全の実施により構造物の長寿命化や修繕や架け替えにかかる費用の縮減を図る等計画的な維持管理の実施が重要となっている。橋梁点検は維持管理に必要な情報を取得する最も基本的な行為であり、国土交通省では2004年に橋梁定期点検要領(案)を示し、5年に一度の近接目視を基本とした定期点検が実施されてきた。しかし、実態として点検、診断等に対する信頼性の確保や人材や技術拠点が整備、市町村における定期点検の実施状況に課題を抱えていた¹⁾。そのような中、2007年に木曾川大橋等で相次いで重大事故につながりかねない損傷の発生が確認されたことや2012年に笹子トンネル天井板落下事故の発生を受け、点検体制の整備や点検実施を推進する各種取り組みがおこなわれてきた。各管理者には次の段階として蓄積された点検結果を活用した効果的・効率的な計画の立案および実行が求められている。このとき投資の必要性や有効性を定量的に説明する必要がありライフサイクルコスト(以下、LCCと記述)の縮減は必要不可欠な要素の一つとなっている。予防保全型の維持管理実施による

効用に関してはLCCやリスク管理の点から多くの研究が行われてきた^{2),3),4)}。また、LCC算出の際には修繕・更新など将来必要な費用を推計するために今後の劣化を予測する必要があることから、点検結果を活用した劣化予測や最適な維持・補修の実施に関する研究も行われてきた^{5),6)}。

2. 既存の研究と本研究の位置づけ

2.1 既存研究

劣化予測手法としては経験等を踏まえた寿命の設定、劣化のメカニズムに基づく理論的劣化予測モデル、実構造物の点検結果の統計的な分析などが挙げられる⁷⁾。

劣化のメカニズムに基づく理論的劣化予測モデルとしては、中性化、塩害、鉄筋腐食の劣化要因を対象に多くの研究が行われ、研究成果が標準示方書に反映されている⁸⁾。

一方、点検結果を統計的に分析する手法も点検データの蓄積を受けて多くの研究が行われている。

橋梁は国、市町村、高速道路会社等管理者が多様であり蓄積されるデータの質や量が異なっている。そのため、それぞれに適した分析や研究が行われている。全国的な点検データを用いて分析を行った研究として玉越ら⁹⁾がある。玉越らは2004年に策定された橋梁点検要領(案)に基づき行われた全国の直轄道路橋の定期

† 連絡著者/Corresponding author

E-mail: ogawa@se.kanazawa-u.ac.jp†

点検結果を用いて劣化の特徴の分析及び統計的劣化予測手法について推計方法の違いによる予測結果の比較を行っている。地方自治体の点検データを用いた劣化予測に関する研究としては、大竹ら¹⁰⁾、小池・長井¹¹⁾がある。大竹らは岐阜県が実施した点検データを用いて、適用された設計基準等により分類を行い部材の健全度との関係を分析し、劣化曲線の傾きや分散が異なることを明らかにしている。小池・長井は新潟県内の市町村管理の橋梁点検データを用いて経年劣化傾向の分析をおこない、マクロ的に見た場合50年程度までは一定の劣化傾向が確認でき、橋長や橋梁種別により劣化傾向が異なることを明らかにしている。劣化予測に用いる際に利用する点検結果（健全度）はカテゴリカルデータであることや健全度が推移した時期が正確には把握できない点等の課題がある。これらを解決する一手段としてマルコフ劣化ハザードモデルの実務への適用も試みられている。津田ら¹²⁾は今後蓄積されたもしくは今後蓄積されるであろうデータに対してマルコフ劣化ハザードモデルによる劣化予測を提案しており、より現実に即したモデルへの改良が続いている状況にある¹³⁾。しかし、必要とするデータの量や質、推定方法の違いによる推定結果の相違¹⁴⁾、得られた結果に対する解釈方法⁹⁾に関して課題があり、実務への導入は容易ではないといえる。

2.2 本研究の位置づけ

橋梁や部材ごとに算出される健全度指標は、劣化の程度に合わせラベリングされた順序尺度であり、それ自体の数字には実数的な根拠は存在しない。橋梁の長寿命化や維持管理にかかる今後の見通しを立てるために長寿命化修繕計画を策定する際にはLCC算出や今後の維持管理費の算出が必要不可欠であり、劣化予測を行う必要がある。劣化予測を行うにあたり、データの取り扱いや得られる結果を用いた説明の容易さ等の理由により健全度を比例尺度として取扱い回帰分析を利用せざるを得ないのが現状と言えらる¹⁵⁾。また、劣化予測を行う際には、得られた点検データのうち補修履歴がある等の特殊なデータについては適宜補正や除外等の処理が必要である。しかし、履歴情報が欠落するなど十分に蓄積されていないことや蓄積されていた場合であってもそれらを適切に反映する手法が確立していないことから、実務上は、特異と想定されるデータを経験知と照合し除外するなど状況に応じ様々な対応が行われている。2006年の北海道建設部の報告書¹⁶⁾によると、健全度ごとに到達するまでの年数について分布を調べ、平均から標準偏差以上に外れる橋梁は特異なデータとして別途劣化曲線を設定する処理を行っている。静岡県橋梁長寿命化修繕計画¹⁵⁾では、経過年数毎に集約されたデータに対して、健全度の低い集団（25%タイル値）が補修されない状態の橋梁である

と考えて曲線近似を行い劣化曲線として採用している。山形県の橋梁長寿命化総合マニュアル¹⁷⁾によると損傷種別ごとに平均到達年を算出し、劣化の進行が見られないデータは除外するなどの処理を行ったうえで劣化曲線を算出している。

上述したように得られた点検結果を劣化予測への活用するためには様々な処理が行われていることから、データの選定における客観的指針や得られる結果の妥当性について検討することは重要と考えられる。

そこで、本研究ではデータ選別における客観的指針として区分線形回帰分析を援用して劣化予測に利用するデータの選定する方法を示し、利用するデータが劣化予測に与える影響について分析する。また、選別したデータを利用し、回帰分析を行った結果とマルコフ劣化ハザードモデルにより得られる結果を比較することにより回帰モデル利用の適用性について検討した。現状の劣化予測に新たな手法や理論的アプローチを示すような新規性はないが、現時点において回帰モデルを使い続けるにあたっての実務における経験知以外の根拠を与えることが本研究の位置づけである。

本研究の構成は以下のとおりである。3.では分析に利用する点検データに関する概要を示し、4.では蓄積された点検データのマクロ的な劣化傾向について示す。5.では劣化予測を行う際の点検データの選定方法について示す。6.では近年研究や活用が進められているマルコフ劣化ハザードモデルによる劣化予測を行い、回帰分析による結果と比較し考察を行う。7.はまとめである。

3. 橋梁点検データ

2003年に「道路構造物の今後の管理・更新等に関するあり方に関する検討委員会」より「道路構造物の今後の管理・更新等の在り方 提言」がなされ維持管理システムの構築が求められた。国土交通省では2004年に橋梁定期点検要領（案）、2007年に道路橋に関する基礎データ収集要領（案）を策定し、橋梁の点検及び維持管理を行ってきた。地方自治体等においても国が策定した要領等を基本にもしくは独自に点検要領等を定めて点検等を行っており、本研究の対象とした石川県でも2002年に石川県版橋梁点検要領（案）、2005年には地域の特徴的な劣化として課題となっているアルカリシリカ骨材反応（ASR）に対して対応するために石川県ASR劣化橋梁の維持管理の手引き（案）等を作成し点検の実施、記録が行われてきた。

本研究の解析に用いるデータは、石川県で2003年から2013年にかけて実施、記録された橋梁点検結果である。点検結果は径間毎に、部材・材料・損傷種別に判定結果が記録されている。それらの結果を主桁、床版、下部工、伸縮装置、支承の部材単位に集約し部材健全度

表-1 橋梁健全度の定義

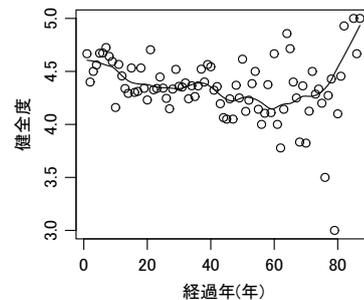
健全度	損傷状況
5	劣化損傷が認められない
4	些細な劣化損傷のみで、点検記録を継続する
3	経度の劣化損傷があり、計画的に維持管理補修する
2	重度の劣化損傷があり、早急な補修対策が必要
1	甚大な損傷で安全確保に支障をきたす（通行止め）

の算出が可能となっている。この結果得られる部材健全度はすべて5段階の健全度として算出されるが、主桁、床版、下部工は鋼材・コンクリートの材料区分により評価対象の項目が異なっている。健全度は表-1に示す5段階の評価区分となっている。本研究における分析では主に上記により得られた径間、部材単位の健全度を用いる。利用可能なデータは1,682橋、径間、点検年毎に分類した場合のデータ数は3,726である。ただし、一部データに欠損が生じている場合が存在するため、データ数は解析により多少異なる。

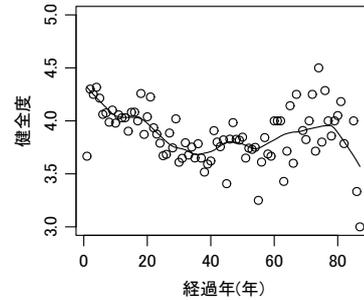
4. 点検データの劣化傾向

ここでは点検データから得られるマクロ的な劣化傾向について分析する。点検の結果橋梁・部材単位の算出された健全度は5段階の離散値で記録され、データ数も多くそのままでは傾向を把握することが困難であるため、経過年数ごとにデータを集計し平均値を算出した。結果の推移を図-1に示す。健全度の推移を把握しやすいよう、lowess 回帰¹⁸⁾により得られた曲線を合わせて示す。平滑化パラメータである平準化窓は0.2とした。なお、橋梁が1960年代以降の経済成長に合わせて急速に整備されてきたことに起因し、架設年（経過年）毎のデータ数は図-2に示すように偏りがあることに留意する。すべての部材に共通して一定の時期までは健全度が低下し、経過年数が大きくなると上昇する傾向がみられる。これは架設からの経過年数が大きい場合は既に補修等が行われ健全度が回復しているデータが含まれる可能性が高いこと、また、図-2に示すように架設後50年以内のデータは比較的データ数が多いが、架設後50年を超えるデータは限られており一部の点検結果に大きく左右されることが原因と考えられる。比較的交換サイクルの短い伸縮装置については架設後20~30年ごろまで、下部工や床版の補修サイクルの長い主要部材については40~60年ごろまで劣化傾向がみられる。それ以降のデータは補修等が加えられたデータと考えられることから、劣化予測に利用するデータとして適切ではないといえる。

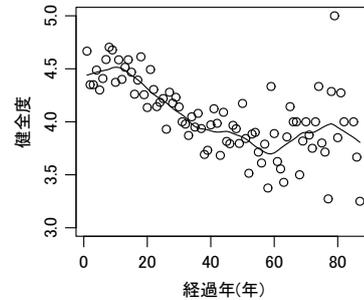
図-3に経過年数別の健全度の割合を示す。各部材ごとに健全度2や3と判定される時期が存在し、おおむね架設後30年を超えると健全度2以下となる判定が増加することが分かる。主桁については、経年による健



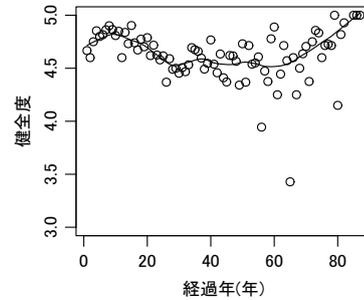
(a) 主桁



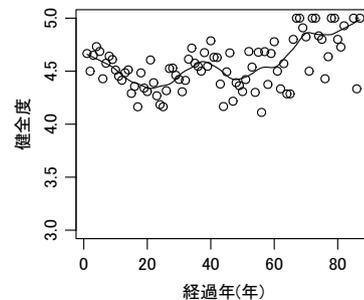
(b) 下部工



(c) 床版



(d) 支承



(e) 伸縮装置

図-1 健全度の平均の推移

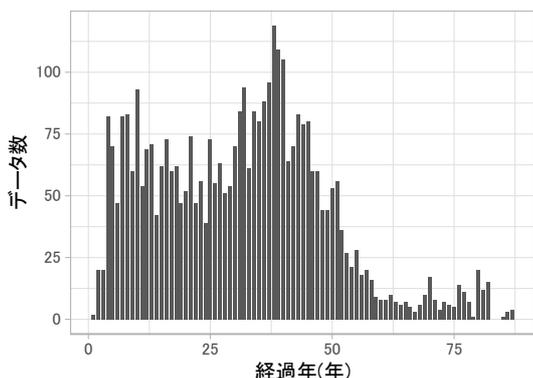
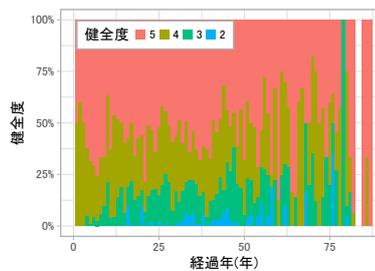


図-2 経過年別データ数

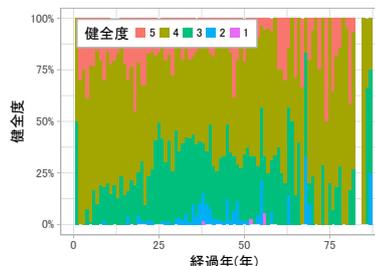
全度の分布に大きな変化が見られず、図-1において下部工や床版に比べ不明瞭な傾向を示す結果を示したと考えられる。下部工については健全度3となる橋梁が比較的早い時期から存在し、増加傾向が見られる。これは洗掘等の外的状況に常にさらされていることが原因と考えられる。一方で経過年数が30年を超えたあたりで健全度3の割合は多少の減少傾向にある。これはデータとして記録された補修記録を確認すると下部工に対する記録データが多く、橋脚の耐震補強に合わせて補修工事の実施の記録も多くみられたことが影響していると考えられる。床版については健全度3の橋梁が経過年数とともに増加していくことが分かる。これは劣化した床版のひび割れ注入工や断面修復など部分的な補修が行われているものの、劣化部周辺もしくはそのほかの個所の床版が順次劣化していることが原因と考えられる。今後もこのような状況が続くようであれば、劣化スピードに対して補修が多い状況と考えられ今後の推移について注意する必要があると考えられる。

5. 区分線形回帰分析によるデータの選定

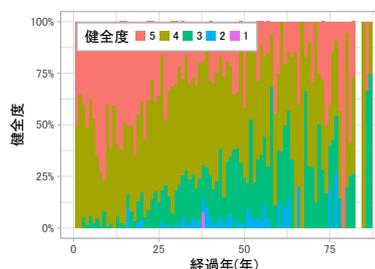
4. では点検結果データを用いて劣化予測を行う際にはデータの取捨選択が必要であることが確認された。しかし、補修履歴が欠落している等の理由により劣化予測に利用する点検結果データを選定することは容易ではない。ここで、取捨選択の一方法として建設後一定以上の年数までは補修等がそれほど実施されていないという仮定のもと経過年数等を基準に取捨選択する方法が考えられる。図-1から視覚的に特定の時期まで劣化傾向があることを捉えることができるが、データを取捨選択する基準点を判断することは容易ではない。本研究では区分線形回帰モデルを用いて劣化傾向の変化点を求め、データを取捨選択する方法を示す。区分線形回帰モデルは muggeo ら^{19),20),21)}による手法を利用した。概要を以下に示す。得られた観測値は(1)式に示す



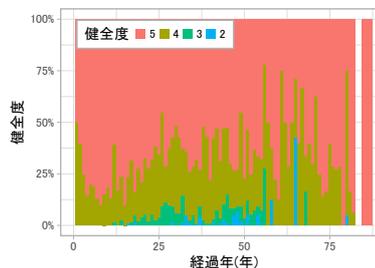
(a) 主桁



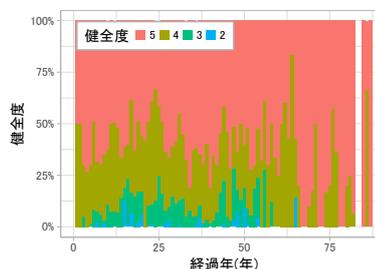
(b) 下部工



(c) 床版



(d) 支承



(e) 伸縮装置

図-3 健全度分布の推移

2区間の一般化線形モデルにより表現可能とする。

$$g(z_i) = \beta_1 z_i + \beta_2 (z_i - \Psi_K) \times I(z_i > \Psi_K) \quad (1)$$

表-2 区分線形近似による推定結果

部材	推定値	標準偏差
主桁	43.3	11.8
下部工	42.8	7.0
床版	43.0	5.4
支承	43.2	5.6
伸縮装置	43.2	6.5

ここで、 γ は確率変数、 $g(\cdot)$ はリンク関数、 $I(\cdot)$ は指示関数、 Ψ_K は breakpoint(以下、閾値という)である。また β_1 , β_2 は左右それぞれの直線の傾きを表す。閾値の推定は式(2)で表現され、 $\hat{\Psi}_K = \tilde{\Psi} + \hat{\gamma}/\hat{\beta}_2$ により $\hat{\gamma}$ が小さくなるように繰返し計算を行い最適化される。なお、 $\hat{\gamma}$ は観測値との差である。

$$\beta_1 z_i + \beta_2 (z_i - \tilde{\Psi}_K) \times I(z_i > \tilde{\Psi}_K) - \gamma I(z_i > \tilde{\Psi}_K) \quad (2)$$

ここでは1点の閾値の推定方法を示したが、複数点の閾値を推定することも可能である。モデル選択は閾値の数に応じたモデルをそれぞれに対してベイズ情報基準(BIC)によりモデル推定を行っている²¹⁾。分析では閾値の数は1~10の範囲内としてモデル推定を行った。回帰モデルは直線回帰、リンク関数は恒等リンク、説明変数には経過年数を利用した。

表-2に閾値の推定値と標準偏差を、図-4に推定結果を用いて回帰した結果を示す。すべての部材で閾値は42~43年、標準偏差は、主桁が11.8とその他は5.4~7と推定された。図-4から閾値までは低下傾向がみられるが、以降は停滞または上昇傾向の線形モデルとなっている。閾値以降のデータは補修履歴等のデータも多く含まれ健全度が高くなっていることが考えられる。以上の結果から、点検データを用いた劣化予測を行う際には建設から40年以内のデータを用いることが妥当であるといえる。ただし、図-1から支承や伸縮装置は建設からの経過が20~30年で健全度の上昇がみられることから、蓄積されたデータ数も考慮した上でデータを選定する必要があると考えられる。

ここで、すべての点検データを利用した場合と図-1、図-4で一定の劣化傾向が見られた架設後40年までのデータを利用した場合についてそれぞれ回帰分析を行い比較考察する。なお、伸縮装置については劣化傾向が見られた架設後25年までのデータを利用する。下部工健全度を対象に、経過年数を従属変数としたいくつかの劣化モデルを用いて係数 a を推定し得られた近似曲線を図-5に示す。なお、いずれのモデルも架設当初の健全度は5であると仮定している。いずれのモデルも健全度3に劣化する時期はおおむね一致する推定値が得られた。複数回の点検結果データの蓄積が不十分であり橋梁全体の劣化過程や今後の劣化の進展が不明であること及び前述のとおり健全度指標は順序指標

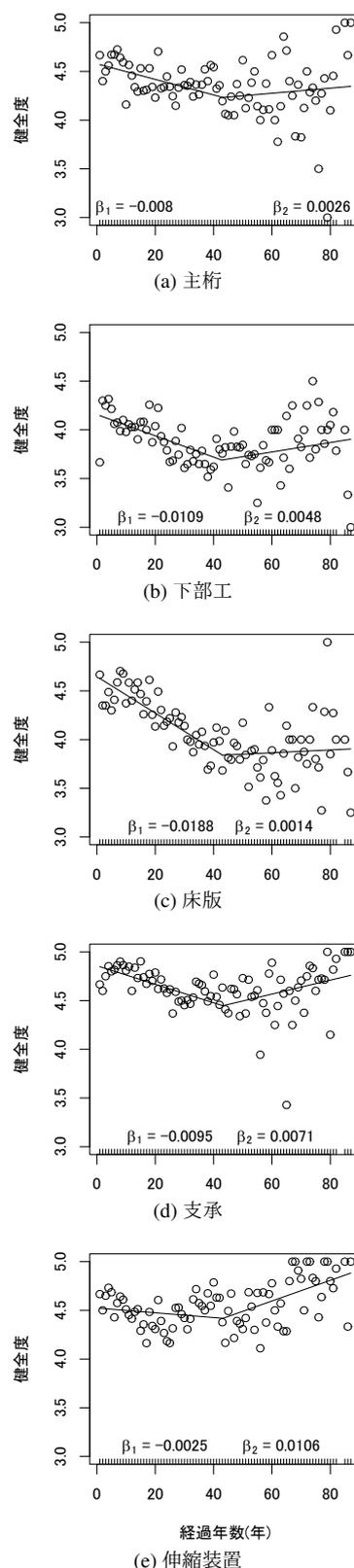


図-4 各部材ごとの区部線形近似回帰

であることから理論的な劣化モデルの設定は困難であり、管理者によって異なる劣化モデルが採用されている。本研究では劣化が加速的に進行するという経験知をもとに設定されることが多い、(3)式による劣化モデ

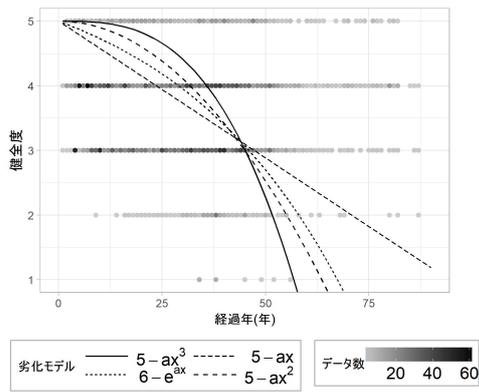


図-5 劣化モデルの検討

るを仮定して劣化予測に関する考察を行う。

$$y = 5 - ax^2 \quad (3)$$

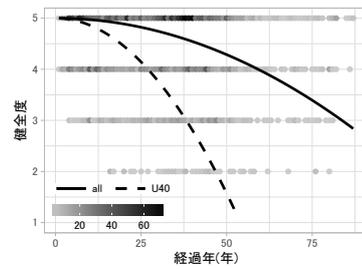
各部材の劣化曲線の違いを図-6 に示す。図中の実線、破線はそれぞれ全データを利用した場合、架設後 40 年までのデータを利用した場合の劣化曲線を、各点は経過年数と健全度推移のプロットであり部材数を濃淡で表わしている。

全てのデータを利用した場合は、80 年を経過後も健全度が 2 以上となるが、建設からの経過が 40 年までのデータのみを利用した場合はおおむね 50 年で健全度 2 となる結果となり、これまで工学的に判断されてきた補修時期と一致する劣化曲線が得られたと考えられる。このことから、物理的な劣化現象を記述するモデルではない回帰モデルで劣化予測を行う際には点検データの選別が必要であること、区分線形回帰を用いることで客観的指標によりデータの選別を行うことができたと考えられる。ここでは架設後一定の時期までのデータは補修等の手が加えられていないという前提の上で劣化予測を行っているが、実際には早期劣化により既に補修されたものが含まれる可能性があり、これらのデータが含まれることによって本来の劣化よりも緩やかとなっている可能性があることに注意する必要がある。

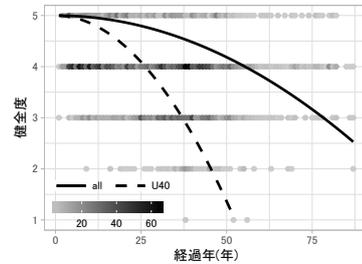
6. 劣化予測手法に関する比較考察

6.1 混合マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化期待パスの推計

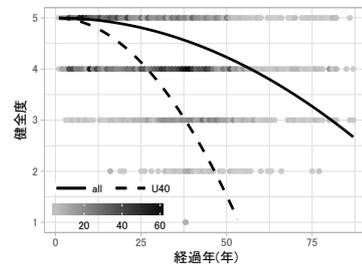
点検結果に基づく劣化予測として回帰分析とは別のアプローチとして、確率的劣化予測手法として津田ら¹²⁾によるマルコフ劣化ハザードモデルや小濱ら²²⁾による土木施設間の劣化速度の多様性を異質性パラメータにより表現した混合マルコフ劣化モデルがある。また、混合マルコフ劣化モデルについてはパラメータ推定の評



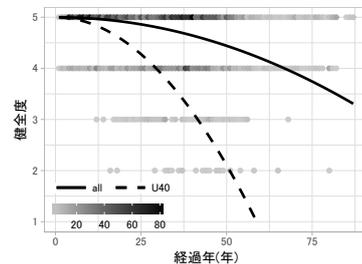
(a) 主桁



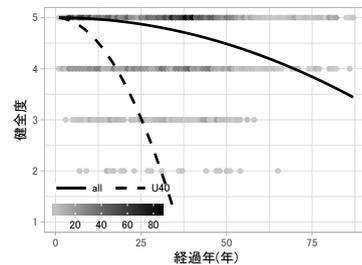
(b) 下部工



(c) 床版



(d) 支承



(e) 伸縮装置

点の濃度はデータ数を示し、実線はすべてのデータを用いた場合 (all)、破線は経過 40 年までのデータを用いた場合 (U40) の回帰曲線を示す

図-6 各部材ごとの劣化曲線

価精度を向上させるために貝戸ら¹³⁾によって階層ベイズモデルが開発されている。

ここでは混合マルコフ劣化モデルのベイズ推計により得られる結果と回帰分析により得られる結果を比較することにより、それぞれの手法により得られる結果の違いをについて考察を行うとともに、5. で示した劣化予測の適用性の確認を行う。モデルのパラメータ推定には R²³⁾, stan²⁴⁾ を用いて作成したプログラムを利用した。マルコフ推移確率行列は (4) 式のように定義できる。

$$A = \begin{pmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_{I,I} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、劣化は常に現状維持または進行すると仮定し $p_{i,j} = 0 (i > j)$ となり、また、遷移確率の定義により $\sum_{j=i}^I p_{i,j} = 1$ が成立する。そのため、上記の条件を満たさない、同一箇所での点検結果において以前の点検結果より最新の点検結果の方が健全となる（健全度が大きくなる）データは解析対象外とした。

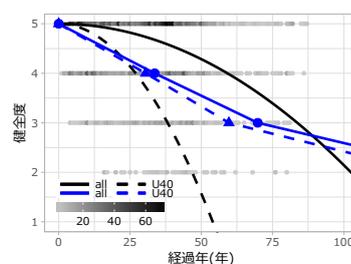
多段階指数ハザードモデルによる一般的なマルコフ劣化モデルは津田ら¹²⁾ に、施設ごとのハザード率（異質性）を考慮した混合マルコフ劣化モデルは小濱ら²²⁾ に、階層ベイズ推定については貝戸ら¹³⁾ に詳述されている。得られたハザード率 θ_i に対し、生存関数 $\tilde{F}_i(y_i^k)$ を用いて次式より期待寿命が算出される。

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \exp(-\theta y_i) dy_i = \frac{1}{\theta_i} \quad (5)$$

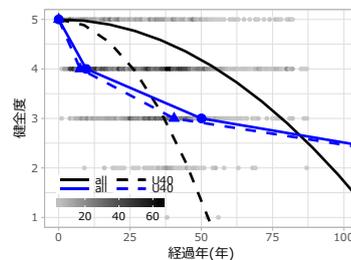
過去の点検記録が十分に存在しないため、1度の点検記録しかない場合は建設時の構造物の健全度は5であったとし、データの存在する初回点検時までの年数を点検間隔として扱う。上記により求めた期待寿命と経過年数の対応関係を期待劣化パスと呼ぶこととする。この手法の利点は、確率的に劣化を予測できる点・個別の橋梁ごとに劣化期待パスが求められる点であると考えられる。しかし、本研究では平均的な劣化について回帰曲線により得られる結果と比較することを目的としているため、ここでは得られた結果を中央値による一本の劣化期待パスで表現する。

6.2 予測結果に関する比較考察

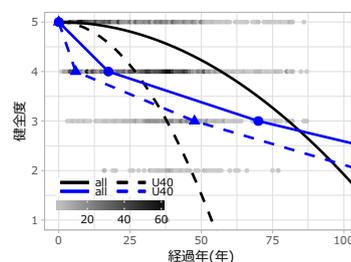
部材ごとに推定された劣化期待パスを図-7に示す。黒色は回帰モデル、青色はマルコフ劣化ハザードモデルによる結果を示し、実線はすべての点検結果データを利用した場合を、破線は建設から25年または40年までのデータを利用した場合の結果を示している。マルコフ劣化ハザードモデルにおいても点検結果の全データを利用した場合に比べ、架設後40年までの期間のデータを利用した場合の方が劣化の進行が速いと推定されたが、回帰モデルほど大きな違いは見られない結果となった。これは2点間の推移確率をもとに計算を行っているため、経過年数の大きなデータに関しては



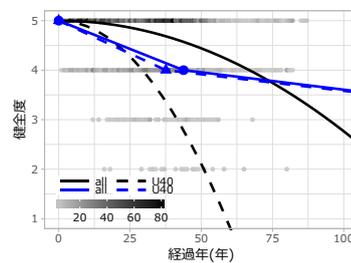
(a) 主桁



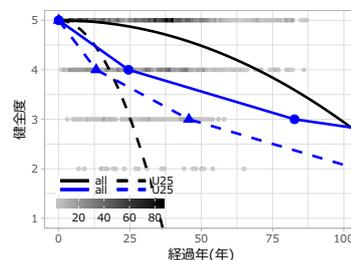
(b) 下部工



(c) 床版



(d) 支承



(e) 伸縮装置

点の濃度はデータ数を示し、実線はすべてのデータを用いた場合 (all)、破線は経過40年までのデータを用いた場合 (U40) の回帰曲線を示す

図-7 期待劣化パス

ほとんど影響を受けなかったものと考えられる。各部材共通の傾向として、健全度が5から4に移るまで

の期間は比較的短い健全度3に推移するまでの期間は長い傾向にあり、架設から50年程度で健全度3に推移することがわかる。一方、健全度2に推移するまでの期間は非常に大きくなっている。これは点検結果が健全度3に留まっており健全度2に推移するデータの蓄積が少ないことが原因と考えられる。

架設後40年以内のデータを用いて行った結果について、手法の違いによる結果を比較すると、下部工、床版についてはおおむね健全度3となるまでの期間はおおむね一致する結果となった。主桁については劣化傾向が緩やかであったこと(図-4)、支承や伸縮装置については健全度2に至るデータが少なかったこと(図-3)が影響し、回帰分析による劣化曲線に比べマルコフ劣化モデルによる期待劣化パスが緩やかとなったと考えられる。以上のことから、下部工や床版については健全度3までの劣化予測については両手法とも同様の結果が得られることが分かった。つまり、現状で用いざるを得ない劣化曲線に一定の妥当性を確認することができたといえる。また、その他の部材については低健全度のデータ数が少なくマルコフ劣化ハザードモデルにおいては劣化期待パスが回帰曲線近似で得られる結果に比べて緩やか(危険側)となるため、リスク管理の点で現在蓄積されたデータでは実務上活用するには十分な検討が必要であるといえる。このような状況においては未知の劣化過程に対して、劣化が加速度的に進行するという経験知が組込まれている、つまり劣化モデルを仮定している回帰曲線の利用が適しているといえる。

今後は2巡目の点検データも蓄積されていくと考えられるが、実際は最低値の評価に至るまで放置されることは少なく、リスク管理の点から健全度の低い橋梁から順次予算要求および補修が実施されると考えられ、評価値の低いデータの蓄積が進まないことが懸念される。劣化予測はいずれの手法においても蓄積された点検データに基づき行われるものであるため、劣化予測の精度を高めるためには健全度の低い点検データが蓄積される工夫も必要であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、理論的にはあいまいさを否めないながらも現状多く用いられている回帰分析による劣化予測を行う際に必要となるデータ選別に対する客観的指針として区分線形回帰分析の援用を試みた。また、順序ラベルである健全度に対して回帰分析を行うことの妥当性について、混合マルコフハザードモデルによる得られる結果について比較分析を行った。事例には、石川県の点検結果データを用いた。主たる結論は以下のとおりである。

- 現在蓄積された点検結果の分析を行い、各部材の

健全度は架設後一定の劣化傾向が見られるが、経過年数が大きくなるに従いデータ不足等により健全度の上昇やばらつきが大きくなり、得られた点検データは適切にデータを取捨選択し劣化予測に活用する必要があることが確認された。

- 劣化予測に利用するデータを客観的に選別する手法として、区分線形回帰分析を行い点検データにおける劣化傾向の変化点(劣化の進行期間)を推定する方法を示した。
- 選別を行ったデータを用いて、回帰分析による劣化曲線と混合マルコフモデルによる劣化期待パスを求め比較考察を行った。劣化過程については違いが見られたが、下部工や床版についてはデータが十分に存在する健全度3(予防保全段階)となる期間は概ね一致した。また、健全度2となる期間は健全度2以下のデータの蓄積が少ないことが影響し両手法による劣化時期が大きく異なる結果となった。

実用上、理論的な裏付けがないまま適用される回帰曲線も、適切なデータ選別を行うことにより管理水準に達するまでの時間をおおよそ推定できることが示すとともに、客観的なデータ選別手法を提供することができた。将来的にも低評価の点検データの蓄積が見込まれない現状において、量的・質的データの蓄積が進むまで実務現場で利用せざるを得ない回帰曲線適用の妥当性を示せたことの意義は大きいと考える。より詳細な劣化傾向を把握することは維持管理上重要であり、今後は劣化状況が詳細に記述されている個別調査に遡り分析を行う必要があると考えている。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST)によって実施された。また、石川県には橋梁点検結果等に関するデータの提供を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 小澤隆: 道路維持管理の現状と課題. レファレンス, Vol. 57, No. 4, pp. 53-70, apr 2007.
- 2) 藤井久矢, 田中新也, 古田均, 堂垣正博: 地震リスクを加味した劣化損傷下にある道路橋梁群の維持管理. 材料, Vol. 61, No. 2, pp. 133-140, 2012.
- 3) 保田敬一, 慈道充, 小林潔司: 橋梁におけるライフサイクル期間や割引率がLCCに及ぼす影響. 建設マネジメント研究論文集, Vol. 14, pp. 113-124, 2007.
- 4) 阿部雅人, 藤野陽三, 阿部允: 線形システムモデルを用いた予防保全の効果に関する考察. 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 2, pp. 325-330, 2012.

- 5) 木内順司, 齋藤善之, 杉本博之: 点検結果のばらつきを考慮した橋梁の最適維持管理計画に関する研究. 構造工学論文集 A, Vol. 57A, pp. 155–168, 2011.
- 6) 藤倉規雄, 吉野隆, 水谷隆夫, 前田哲史: 劣化メカニズムを考慮した確率モデルによる最適な点検・補修時期の決定法. 土木学会論文集D, Vol. 66, No. 1, pp. 1–13, 2010.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム (BMS) —. pp. 1–13. 2009.
- 8) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2014.
- 9) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の実測データによる道路橋の劣化特性とその定量的評価. 土木学会論文集F4 (建設マネジメント), Vol. 70, No. 4, pp. I.61–I.72, 2014.
- 10) 大竹雄, 流石堯, 本城勇介, 村上茂之, 小林孝一: 統計的手法を用いた橋梁点検データベースに基づく橋梁健全度評価に関する基礎的研究. 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2, pp. I.813–I.824, 2011.
- 11) 小池真登, 長井宏平: 新潟県市町村における橋梁点検データを用いた経年劣化傾向分析. コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 1339–1344, 2015.
- 12) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定. 土木学会論文集, Vol. 2005, No. 801, pp. 801.69–801.82, 2005.
- 13) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No. 4, pp. 255–271, 2012.
- 14) 近田康夫, 鈴木慎也, 小川福嗣: 点検結果に基づく劣化予測のためのマルコフ推移確率推定方法に関する一考察. 構造工学論文集 A, Vol. 61A, pp. 70–80, 2015.
- 15) 静岡県交通基盤部 道路局道路整備課: 社会資本長寿命化計画橋梁ガイドライン (改訂版), 2016.
- 16) 北海道建設部: 公共土木施設長寿命化検討委員会報告書, 2006.
- 17) 山形県県土整備部: 山形県橋梁長寿命化総合マニュアル, 2015.
- 18) 竹澤邦夫: みんなのためのノンパラメトリック回帰. 吉岡書店, 2001.
- 19) Vito M. R. Muggeo: Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, Vol. 22, No. 19, pp. 3055–3071, 2003.
- 20) Vito MR Muggeo: Segmented: an r package to fit regression models with broken-line relationships. *R news*, Vol. 8, No. 1, pp. 20–25, 2008.
- 21) Vito M. R. Muggeo and Giada Adelfio: Efficient change point detection for genomic sequences of continuous measurements. *Bioinformatics*, Vol. 27, No. 2, p. 161, 2011.
- 22) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング. 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 857–874, 2008.
- 23) R Core Team: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013.
- 24) Stan Development Team: Stan: A c++ library for probability and sampling, version 2.10.0, 2015.

(2017 年 9 月 25 日 受付)

(2018 年 2 月 1 日 受理)