

道路橋の状態変化やライフサイクルコスト推定の不確実性

桑原正明・宮原 史・松村裕樹・白戸真大

1. はじめに

全国には約70万の道路橋がある。道路ネットワーク機能を滞りなく安全に発揮させ続けるためには、道路橋の将来の状態や維持修繕費用の見通しを持ち、長寿命化への投資を図ることが不可欠である。

中長期の維持管理計画を策定する際には、何らかの指標を設定し、維持管理方針や状態の経年変化に複数のシナリオを設け、それらが指標に与える影響の違いを分析するなどして維持管理方針を立てていくことが多い。その際の標準的な指標は定まっていないが、これまで策定された長寿命化修繕計画では、ライフサイクルコスト（以下「LCC」という。）やその縮減額のように金額そのものを直接の指標にする例が多い¹⁾。しかし、いずれの指標にしてもその信頼性を議論するうえでは、構造物の劣化の実態やその統計的な性質についての客観的データを取得し分析することが必要である。

そこで、この報文では、まず、国管理の道路橋で平成16年から定期的を取得してきた状態データを集計し作成した統計的劣化モデルの代表例を示す。次に、典型的な道路橋において、統計的劣化モデルを組み込んだシミュレーションを用い、計算上のLCCや維持修繕時期の予測幅を試算する。そして、統計的劣化モデルにより算出したLCCの指標としての適用性や、それを計画策定において参照する際の留意点を考察する。

2. 劣化モデルの有する不確実性

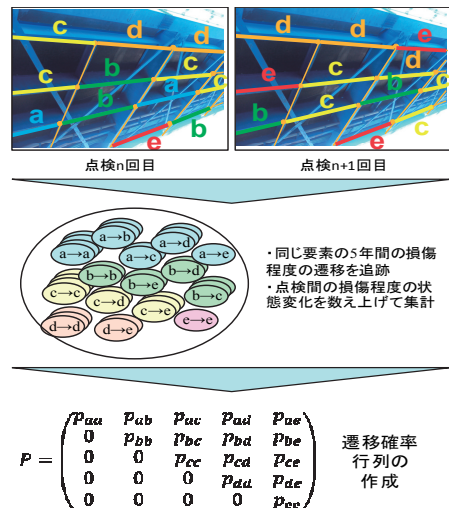
これまで、維持管理方針や状態の経年変化に複数のシナリオを設けるための橋の劣化に関するデータについて、その不足が指摘されてきた¹⁾。そこで、国土交通省では、平成16年に国管理の道路橋の定期点検要領を刷新した際に、各部材毎に次回点検までの対策の必要性の診断を行うだけでなく、その損傷程度の評価の記録を定型化し追加した。これは、様々な環境条件で多くのサンプルデータを集めるために、国が管理する約24,000橋もの道路橋が活用

可能と考えられること、また、状態の経年変化を客観的に把握し続けることで、様々な条件下での道路橋の統計的な劣化特性が得られると考えられることによる。

対策の必要性の診断は、部材毎かつその部材に見られる損傷種類毎に、次回点検までの間の措置の必要性に関して、技術者が総合的な技術的所見を示すものである。損傷の原因や内部状態の推定、部材の重要度、これらも踏まえたときに変状が部材機能に与える影響や次回点検までの間の進展、他の損傷や他の部材の状態との関係性も考慮される。

それに対し、損傷程度の評価は、技術者固有の判断の余地や部材の重要性等の観点をできるだけ排除し、写真やスケッチと同様、いわば外観のありのままを記号化し、記録するものである。定期点検要領では、腐食面積やひび割れ幅のような客観的な評価・分類の尺度を損傷種類毎に予め与えてあり、橋の周辺条件等の違いによらず一定の区分がされるようになっている。そして損傷程度の評価の記録は、図-1の写真のイメージのように、各部材をさらに細分化した要素という単位で行う。これは、ある損傷種類をみたときに、ひとつの部材の中でも、例えば桁端部と中央部では腐食の発生の有無や腐食面積や深さが異なることも記録に反映させるためである。

これまでに、国管理の道路橋では、2回以上の要素単位の損傷程度の記録が行われてきた。これに対



して、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、状態の遷移について統計分析を行っている。図-1に示すように、各要素の損傷程度の評価の遷移を集計することで、材料・部材種類、損傷種類、その他環境条件等に応じて、状態の5年遷移確率行列を得ることができる。これが、基本的な統計的劣化モデルになる。さらに、遷移確率行列のべき乗を取れば当初良好な状態の部材や要素が、10、15…年後にどの状態にあるかの確率分布を求めることができ、これを状態の平均的特性の時間変化の関数として近似すれば劣化曲線となる。これも統計的劣化モデルの一つの形である。

図-2の棒グラフは、鋼板桁橋のコンクリート床版の床版ひびわれについて、遷移確率行列のべき乗を取ることで、5年毎の状態確率分布を計算した結果である。棒グラフでは、色毎に損傷程度a～eを割り当てている。aが損傷がないか軽微、eが最も損傷の程度が大きい。なお、損傷種類毎の損傷程度の区分は、例えば、文献2)にまとめてあるので参照されたい。図-2の左縦軸に損傷程度の比率をパーセント表示している。同じ経過年でも、コンクリート床版の状態はばらつくことがわかり、例えば、経過後40年でもa（水色）のままであるものも一定の割合で存在するし、e（赤色）の状態に達するものも一定の割合で存在する。また、図-2では、損傷程度を1から0のスケールになるように設定したうえで、棒グラフの各年代毎に損傷程度分布の重心位置を求め、それを時間の関数として近似した結果を赤線で示した。グラフ右側の縦軸がその数値に相当する。グラフの右縦軸と左縦軸は対応せず、右縦軸の1.0と左縦軸の100%は意味が異なることに注意された

い。また、劣化のばらつきの度合いも把握するために、参考までに平均値 $\pm 1\sigma$ に対応する曲線も破線で示した。これらは、劣化の平均的な振る舞いと平均特性のばらつきを表す劣化曲線であり、ここで示した曲線の計算方法は文献2)を参照されたい。

設計年代や損傷の状態に応じて、各損傷程度の比率やその変化、平均的な劣化曲線が異なることが分かる。よって、詳細な状態記録により様々な条件を反映することで、劣化の速度や拡がり方等の特徴の違いが反映できること、平均的劣化特性のモデル化については精度が向上することが確認できた。しかし、図-2における各劣化曲線まわりの標準偏差（ばらつきの程度）は、条件分けをしてもほとんど変わらない。

このように、部材や橋を、各々劣化特性を持った要素の集合として捉えたときに、客観的かつ大量のデータを用いることで、要素の集合の状態の平均的な遷移の予測精度は改善できることがわかった。これよりも大量かつ均質なデータを得られれば、さらに条件を細分化したうえで、さらに詳細な条件毎の平均的な遷移を表すことができるようになるかもしれない。他方、今回、これまでになく大量かつ客観的に取得したデータを用いたにも関わらず、結果として、依然、平均的な遷移に対して大きなばらつきが存在しつづける劣化モデルにならざるを得ないことも明らかになった。つまり、統計的劣化モデルの精度を追求することには限界があり、今後は、個別の橋の劣化予測に正解はない、または、精度がこれ以上著しく向上することもないという前提で、状態予測結果をどのように参考にすべきかという議論を深めるべきである。

以上のほか、国が管理する道路橋の損傷程度の評価結果を統計的に分析し、劣化の遷移、平均的な性質やばらつきなどの統計的劣化モデルや、統計的劣化モデルを作成したり活用したりするときの注意点の考察などを、国総研資料第985号²⁾にまとめているので、興味のある方は併せて参考にされたい。

3. 劣化モデルが有する不確実性を反映したLCCの算出

2.のおわりでは、点検結果から得られる平均的な劣化特性を用いてLCCを試算するにあたって、試算結果の活用方法によっては、その不確実性が無視できない可能性を指摘した。そこで、統計的劣化モ

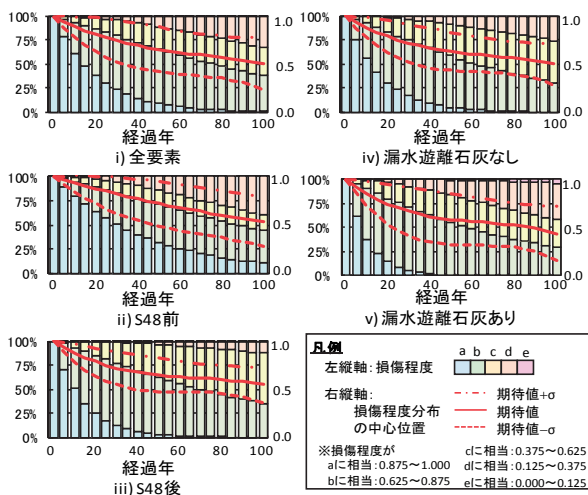


図-2 状態確率分布と劣化曲線

デルが有する不確実性がLCCや補修時期の予測結果の不確実性に与える影響について試算してみる。ここでは劣化モデルの不確実性に着目するので、補修工法や単価については統計的な平均的性質を用いたうえで、その統計的な不確実性は扱わない。

(1)対象橋梁とシミュレーションの方法

試算対象は、規模や形式が一般的な桁橋を想定した、橋長20.2m、全幅員10.45m（有効幅員9.25m）、橋台高さ10mの単純非合成鉄桁橋である。試算の対象とする部材種別とその変状を表-1で示すように仮定する。また、初期状態は全ての部材で健全であると仮定する。計算では、図-3のように橋を分割方法の異なる2通りでモデル化する。モデル1は、同じ種別の部材については常に同じ状態にあると仮定するものである。これは、大量の橋を扱わねばならないが、部材種別毎の劣化特性の違いは区別しておきたいときを想定している。モデル2は、2.において示した、要素単位で取得したデータからの統計的劣化特性をできるだけ活用できるよう、部材ならびに断面位置を区分するモデルである。

表-1 試算で考慮する部材種別と変状の種類

部材種別	対応する変状の種類（各部材1種のみ）
主桁	腐食
床版	床版ひびわれ
下部構造	ひびわれ
支承	支承の機能障害
伸縮装置	路面の凹凸

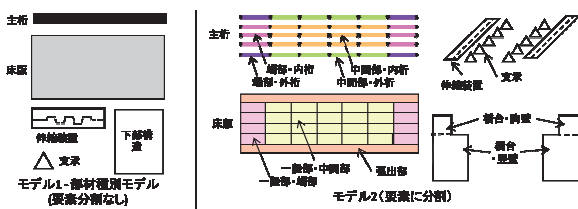


図-3 シミュレーションに用いたモデル

本稿では、LCCの計算をモンテカルロシミュレーションを用いて行う（図-4）。

各部材・変状の状態の遷移を5年毎に2.で述べた手法で算出した遷移確率に基づいて確率的に予測することを50年間分を行う。各損傷に対する措置方法は場面に応じ多種多様であるが、ここでは遷移確率を基に予測した損傷程度がdに達したときに、dとなった範囲に措置が施され、損傷程度がaに戻ると仮定する。この計算を、モデル1と2のそれぞれに対して1000回繰り返し、経過年毎の累積費用の推

MCSでの前提条件

- 対象要素の損傷程度の遷移確率は要素単位の記録の結果に基づく

e.g. 鋼橋の防食機能の劣化

	a	b	c	d	e
a
b
c
d

- 損傷状態は5年に一度、与えられた遷移確率行列に従って変化
- 損傷程度がdになったとき、補修が行われる（物理的な意味はない）

対象要素で劣化のランダム予測

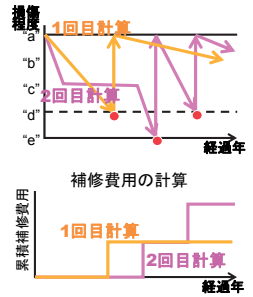


図-4 モンテカルロシミュレーションの方法

移のサンプルを1000個ずつ得る。部材種別・変状種類・部材位置や断面位置に対する劣化特性は、国総研資料第985号にまとめてある遷移確率行列²⁾で与えた。措置単価は、積算単価が明らかなものから代表的なものを選んで与えた。

なお、ここに示す試算は、試算方法の標準を提案しようとしているものではないことに注意されたい。試算にあたっては、対象とする部材種別や変状の種類、図-4のような試算手順そのものや試算に必要な様々な項目について様々な仮定を与える必要があるが、試算目的によっても手順や仮定は変わるし、管理者毎に橋の状態を表すデータの質や量も異なるので仮定方法は一定ではない。たとえば、実際には、措置の時期や内容は、定期点検における診断結果によるか、それを受けて別途行う調査結果に基づき工学的に判断するものだが、LCCの試算の中では、何らかの定量的な判定ルーチンや措置内容を仮定せざるを得ない。道路橋全体の健全性の相対的な違いを損傷程度の評価から換算、比較するために国総研が既に提案している総合評価指標³⁾を用いることも考えられるが、ここでは、試算の目的もふまれば、この点については特別な工夫をせず、便宜的にどの損傷種類・部材も、損傷程度dに達したときとした。ただ、損傷程度と診断結果は1:1で対応するものではなく、損傷程度を閾値とすることは、本質的には損傷程度の評価の正しい使い方ではないことに注意されたい。

(2)LCCの計算結果

図-5に、モデル2について、1000回の繰り返し計算の中の10回分をランダムに抽出し、累積費用の変化を示した。累積費用はばらつき幅を持つだけでなく、増加する時期も試算毎に異なることが分かる。統計的な劣化特性にばらつきがあるため、個々の橋の措置実施時期の推定結果もばらつくのである。こ

の結果からも、実際の維持管理にあたっては、統計的劣化モデルを用いたシミュレーションで措置の必要時期を求めるのではなく、技術者が措置の必要性を診断することの必然性が改めて考察できる。

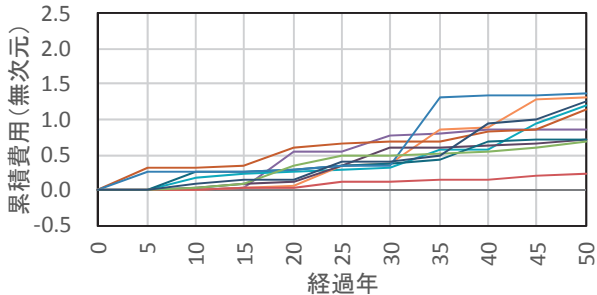


図-5 モデル2のLCC計算結果 (10サンプルを抽出)

図-6に、モデル1とモデル2を用いて計算した累積費用 (モデル2の50年後の平均累積費用を1とした) の変化を比較した。累積費用の平均値を比較すると、当初はほぼ等しい期間が続くが、徐々に乖離が始まる。また、ばらつき幅 (標準偏差 σ) の経年変化を見てみると、年代が経つほど乖離が顕著になることが見て取れる。ばらつき幅については、50年後の費用では、モデル1では0.8程度、モデル2では0.3程度となる。統計的劣化特性の平均的な性質の違いをできるだけ考慮したモデル2でも、試算精度が良いとは言えない。

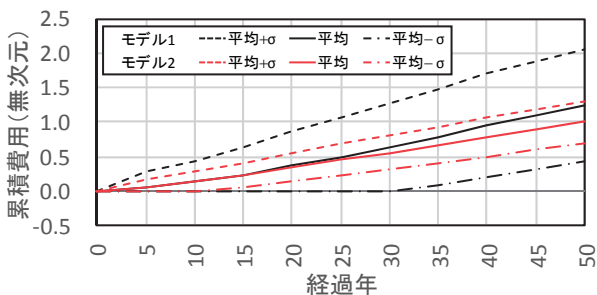


図-6 モデル1とモデル2のLCC計算結果比較

ただし、管理橋梁全体のLCCの合計値を試算することを考えれば、個々の橋において試算結果を利

用するときとは別の視点の考察もできる。個々の橋については、モデル1のように粗い部材分割をしても、モデル2のように詳細な部材分割をしても、いずれも平均的な劣化特性を使っていることや、実態の合計値が平均的な特性を代表すると考えれば、集合に含まれる橋数が多ければ、いずれの試算値も実態の平均値に近づくことが期待できる。逆に、橋数が少ないときには、モデルによらず計算結果の取り扱いに特に注意を要すると考えられる。

4. まとめ

直轄国道の定期点検結果に基づく客観的な状態データから、劣化の遷移モデルを求めた結果を示し、それを用いてモデル橋梁のLCCのモンテカルロシミュレーションを行った。その結果、現状で使用できる最も精緻で多量の統計データを用いたとしても、劣化曲線はLCC試算用のモデルにしかなり得ず、平均的劣化特性を用いて推定した額については、確定的なものではないとして扱うべきであることを確認した。したがって、維持管理方針や計画の立案にあたっては、コスト削減額そのものを直接の目標にすることは避けるのがよく、コストそのものの信頼性の影響を出来るだけ受けずにシナリオを比較可能な指標のあり方について議論すべきと考えられる。国総研としても、さらなるモデルケースでの試算等や、既に提案している道路橋の総合評価指標の更なる活用のための研究を進めたい。

参考文献

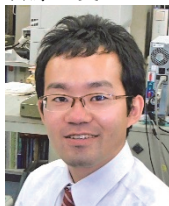
- 1) 社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視—道路橋の保全等を中心として—結果に基づく報告、総務省、2010
- 2) 国土技術政策総合研究所資料No.985：定期点検データを用いた道路橋の劣化特性に関する分析、2017
- 3) 国土技術政策総合研究所資料No.766：平成24年度道路橋構造物に関する基本データ集、2014

桑原正明



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室 主任研究官
Masaaki KUWABARA

宮原 史



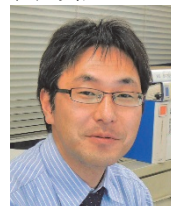
国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室 主任研究官
Fumi MIYAHARA

松村裕樹



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室交流研究員、現 (株)荒谷建設コンサルタント品質企画部
Hiroki MATSUMURA

白戸真大



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長
Masahiro SHIRATO