

[特 集]

実測データに基づく構造物の劣化予測

貝戸清之¹・阿部允²・藤野陽三³

¹正会員 博士(工学) 株式会社 BMC (〒261-7125 千葉市美浜区中瀬 2-6 WBG マリブウエスト 25 階)

E-mail: kaito@hashimori.jp

²フェロー会員 株式会社 BMC 代表取締役 (同上)

³フェロー会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

構造物に対するライフサイクルコスト解析の信頼性の向上や戦略的な維持管理システムの確立には、実測データに基づく劣化予測は不可欠である。本研究では、はじめに、構造物群全体の劣化傾向を把握することを目的として、劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出手法を構築した。その妥当性に関しては実橋梁の目視検査結果を用いて実証し、さらに、部材の補修・補強・取替えの実施が予測結果に及ぼす影響についても考察を加えた。つぎに、個別の構造物の劣化予測に対しては、算出した劣化速度を確率量として捉えて、対象とする構造物の過去の検査履歴を反映することができるマルコフ過程を用いた確率論手法を提案し、一試算を行った。

Key Words: deterioration prediction, deterioration rate, visual inspection, bridge, strategic maintenance, life cycle cost analysis, probabilistic approach

1. はじめに

我国の膨大な社会基盤施設においては老朽化や損傷による劣化が深刻化しており、それらに対する維持管理費は増加の一途をたどると予測されている¹⁾。一方、昨今の社会情勢を考慮すると、公共事業費の縮減は避け難い状況にある。さらに、公共事業の実施を巡ってはその是非が問われる事例が増えてきている。これらのことから判断すると、今後、管理者や事業者は構造物を維持管理していく上で、投資の必要性和有効性を定量的に説明できる論理を構築しておくことが要求されよう。

具体的には、限られた予算をどの構造物から優先的に割り当てるのか、また選定された構造物に関しては、維持管理を行うことがどの程度の便益をもたらすのか、しかも一定のサービスレベルを保持しながらいかに総費用の最小化を図るのか、といった経済性ベースでの議論が不可欠である。これらの評価手法としては費用便益分析²⁾やライフサイクルコスト解析³⁾(以下 LCCA と略記)等が概念的に受け入れやすいこともあり、近年着目されている。しかし、実用化に際しては克服すべき課題が多く、実務での適用事例は希少である。これら二手法の課題に対して個々に解決策を探ることは重要であるが、費用便益分析は広義の LCCA と解釈できるので、以下での議論は LCCA に焦点を当てることとする。

LCCA は既述した通り予算を確保するための手段とし

て、あるいは維持管理を戦略的かつ合理的に行うための手段として有効である。実用化の難しさは、不確実性下での意思決定を強いられることに尽きる。社会基盤施設の維持管理における不確実性の主要因をあげると、

- ・補修・補強等の各種費用
- ・突発的な事故・災害のリスク
- ・劣化予測(構造物の劣化過程)
- ・補修・補強等の効果とその後の劣化過程
- ・ユーザーコスト
- ・要求性能やサービス水準の変化

など、大別すると「投資額」と「投資時期」になる。

「投資額」の観点からは、設定変数の不確実性が LCC に及ぼす影響について、感度分析やモンテカルロシミュレーションを用いた定量的評価がある⁴⁾⁵⁾。地震等のリスクに関しては、導入の概念を示した事例⁶⁾や、リスクの影響を確率論的に組み込んだ LCCA が提案されている⁷⁾。ユーザーコストでは、これを供用の中止に伴う迂回による遅延コストとして定義した、北海道内の橋梁に対する試算事例がある⁸⁾。

一方、「投資時期」を決定する要件である劣化予測は、社会基盤施設を対象とした場合には予測が長期に渡るため、意思決定に更新という柔軟性を持たせておくことが望ましい。すなわち、LCCA の立案段階では構造物群全体の平均の劣化を予測し、その後、検査結果が得られる度に劣化履歴を反映させた形で個別の構造物の劣化予測

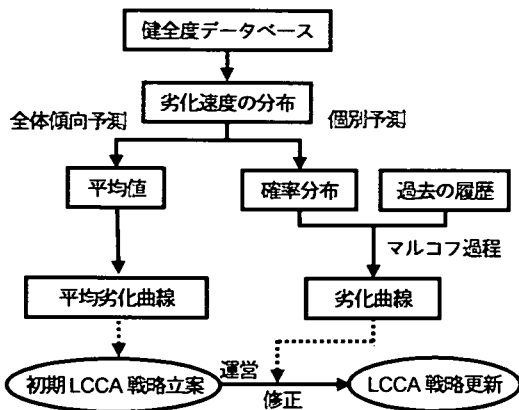


図-1 提案する劣化予測の流れとLCCAにおける役割

を行うスキームである。前者については、目視検査による評価点のような実測データから平均劣化曲線を算出することによって、全体の劣化傾向を予測している事例がある。しかし、この手法では、データの扱い方に起因して実際の劣化よりも緩やかな結果を与えることが指摘されている⁹⁾。また、後者の個別構造物を対象とした劣化予測手法は、ほとんどがマルコフ過程を援用したものである¹⁰⁾。マルコフ過程では現時点のデータに過去の全情報が集約されると考えてそのデータのみを使用するために、過去の劣化履歴が異なっても現時点で同じ劣化度合いであるならば、同じ予測結果を与えるという問題がある¹¹⁾。

以上を踏まえ、本研究では、①劣化速度に着目した新しい劣化予測手法の提案、②実橋梁の目視検査結果を用いた平均劣化曲線の算出および妥当性の検証、③部材の補修・補強・取替えの実施が予測結果に及ぼす影響の考察、④劣化速度に基づくマルコフ過程による個別の構造物に対する劣化予測、を目的とする。

はじめに、実測データを用いた既存の劣化曲線の算出における問題点を述べ、解決策として劣化速度に着目した手法を提案する。つぎに、ニューヨーク市（以下、NY市と略記）の管理橋梁に対する9年間の目視検査結果から平均劣化曲線を実際に算出し、提案手法の妥当性を既存手法との比較によって検証する。また、補修等の実施の影響については、それらが仮に実施されなかったとした場合にどれだけ健全度が低下していたかを推定した劣化曲線を算出し、劣化予測に与える影響を考察する。最後に、個別構造物の劣化予測に対しては、実質的に現時点と過去一分期のデータの情報を反映している劣化速度によるマルコフ過程に基づく手法を提案する。構造物群全体と個別構造物に対する提案する劣化予測手法の流れとLCCAにおける役割を図-1に示す。

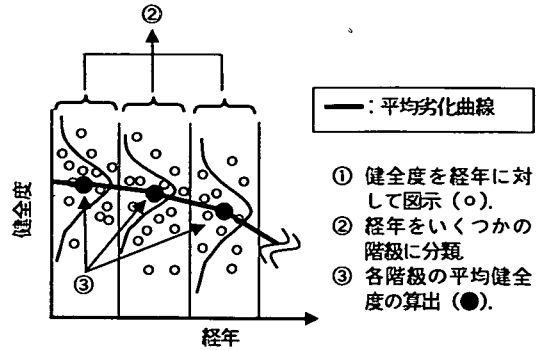


図-2 既存の平均劣化曲線算出の概念

なお、本研究を進める前提として、検査結果の定量的な評価手法が確立しており、データが蓄積されていることとする。また、定量的な検査結果を以下、健全度と呼ぶ。

2. 劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出手法

構造物群全体の劣化予測は、一般的には平均劣化曲線の算出と等価である。本章では、最も簡易でかつ実用的な既存手法の問題点を指摘し、劣化速度に着目した平均劣化曲線の新しい算出手法を提案する。

(1) 既存の平均劣化曲線の算出における問題点

構造物の平均劣化曲線を算出するには、まず同一の構造物形式で同一の環境条件下にある構造物を抽出し、それらの健全度を用いる。その後、図-2に示すように①全ての健全度を検査実施時点における経年に対して図示した後、②経年をいくつかの階級に分類し、③各階級の平均健全度を算出する、という手順で平均劣化曲線を得る。

しかし、経年を軸にしたこの手法では、実際の劣化を精度よく把握することは困難である。これは大きく分けて次の2点の理由による。

一つは、部材の補修・補強・取替え（以下、補修等と略記）によって健全度が回復した構造物が平均健全度を算出の際に含まれることによる。このために、劣化予測が実際と比べて緩やかになるということが多くの報告で指摘されている¹¹⁾。したがって、平均劣化曲線を算出する上で、補修等の実施の有無などの履歴を知ることは不可欠な要件となる。この点に関して、検査体制が確立していれば補修等の実施は健全度の回復を目安として知り得る。ところが、確立以前については存在している検査台帳頼みとするしかなく、当然古い構造物になるほど作業は困難を伴う。また、たとえ明確に知り得たとしても、補修等により健全度が回復した後の構造物の実質的な経年を換算できない（取替えの場合は経年0と扱える）た

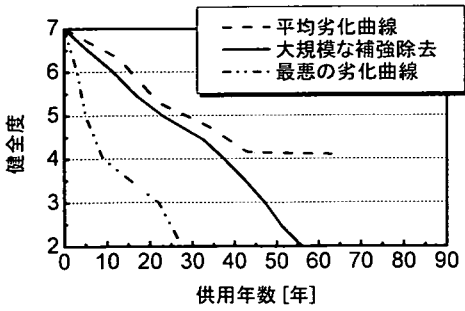


図3 既存手法による平均劣化曲線の一例¹²⁾

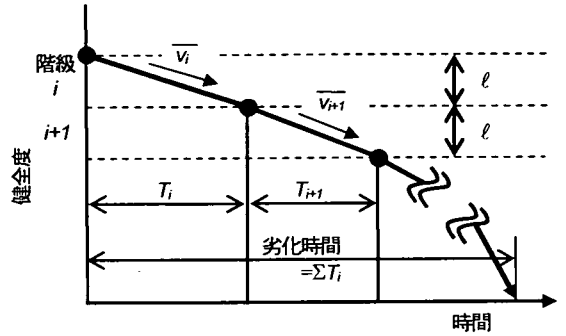


図4 劣化速度に基づく平均劣化曲線算出の概念

めに、使用できるデータは補修等の実施以前に限られてしまい、データの数量としての信頼性の問題が生じる。

もう一つは、補修等を実施したことにより見かけ上健全度が回復したデータの取り扱いで、このようなデータを単に計算から除外してよいかという点である。通常、補修等が実施される構造物は、平均よりも劣化の進行が速かったためであり、そういった構造物を除外した平均劣化曲線もまた緩やかな予測結果を与える可能性がある。

したがって、もし補修等が実施されなかった場合に健全度がどの程度低下していたのかを推定することも重要である。

まず、一つ目の問題点に関して実例を通して検証する。図-3はNY市が管理する橋梁の1994年度の目視検査結果を用いて先述の手法により算出された平均劣化曲線である¹²⁾。健全度は、7が新設、2が使用限界を意味する。なお、橋梁の健全度は、数種の部材の健全度の重み付き平均により算出されるが、詳細は3(1)節で述べる。図中の破線は、約700橋に対する平均劣化曲線を表す。健全度は、供用開始後より徐々に低下しているが、40年経過後はほぼ一定値を保っている。一方、実線は大規模な補強が実施された、もしくはその可能性を否定できない橋梁を除いた平均劣化曲線であり、平均55年で使用限界2に達するという結果になっている。両劣化曲線を比較すると、補修等が実施された橋梁を除外しなければ、劣化予測は安全側の結果を与えることがわかる。

ところで、図-3の解析を行ったNY市役所交通局のヤネフ博士によると、補修等の実施の見極めについて本ケースでは以下のような対処をしたそうである。NY市で検査体制が確立された1982年以降は、補修等の履歴は橋梁ごとに詳細に記述されているのでこれらを参考に、あるいは健全度の回復から判断した。反面、それ以前に関しては、道路の通行止めの実施の有無しか判断材料が無く、通行止めを必要とする大規模な補強実績のみを取り除くに止まった。その結果、過去に通行止めがないと明らかに判断できる以外の不確実な橋梁も除外すると、最終的に計算に用いた橋梁数は約35程度となった。

以上から、既存手法では手法自体は明解であるものの、精度を確保するためには適用条件は大きく限定されることがわかる。そこで、この問題点を解決するために、2.(2)節で劣化速度に着目した新しい平均劣化曲線の算出手法を示し、3章で実データを用いた検証を行う。また、検証では、後者の問題点についての試算例も併せて示すこととする(3.(3)節)。

(2) 劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出手法

既存手法の本質的な問題は、構造物や部材の実質的な経年を把握しなければならない点にある。本提案手法では劣化速度に着目し、2つの健全度間の相対的な時間変化の算出として、この問題を置き換えることで解決を試みる。以下に具体的な算出手法を述べる。

はじめに、ある検査時点*i*における健全度を*r*、次の検査時点*i'*における健全度を*r'*とする。*n*は検査の回数である。ここで、劣化速度*v*は、時間*t-r'*で線形であると仮定すると、次式のように健全度の変化率として表すことができる。

$$v = \frac{r' - r}{t' - t} \quad (1)$$

一般的に、構造物の劣化が進むということは、 $r' < r$ であるので、上式は $v < 0$ となる。したがって、以下では、*v*の値の物理的な解釈として、 $v < 0$ は「通常劣化」、 $v = 0$ は「通常劣化、もしくは維持管理の効果」、 $v > 0$ は「補修・補強・取替えの効果」と扱うこととする。ただし、 $v > 0$ は前節で述べた理由により計算から除外する。

つぎに、経年ではなく、健全度に関して階級分けを行い、ある健全度*r*とそのときの劣化速度*v*を、*r*が属する階級に分類していく。全階級の数を*N_c*。階級*i*に属する劣化速度の総データ数を*M_i*。階級の幅を*ℓ*とすると、階級*i*の平均劣化速度 \bar{v}_i から次階級*i+1*に到達するまでの平均劣化時間*T_i*を次式で算出することができる。

$$T_i = \ell / \bar{v}_i = \ell / \left(\sum_{j=1}^{M_i} v_j / M_i \right) \quad (i=1, 2, \dots, N_c) \quad (2)$$

表-1 橋梁全体の健全度評価に用いる 13 部材とその重み¹³⁾

番号 <i>i</i>	部材名	重み w_i	使用限界
1	支承	6	1
2	背面壁	5	1
3	橋台	8	2
4	擁壁	5	1
5	橋梁台座	6	1
6	主部材	10	2
7	2次部材	5	1
8	高欄	1	1
9	歩道	2	1
10	床版	8	2
11	舗装	4	1
12	橋脚	8	2
13	添接	4	1
		72	

表-2 NY市の目視検査による健全度の7段階評価基準¹³⁾

健全度	物理的な意味
1	崩壊、または潜在的な危険
2	1と3の間
3	深刻な劣化、または要求性能を満了していない
4	3と5の間
5	軽微な劣化ではあるが、要求性能は満了
6	5と7の間
7	新設状態

全ての階級で上式の平均劣化時間を算出し、それらの総和を取る。この総和が使用限界に達するまでの劣化時間を与え、履歴が劣化曲線となる。概念を図-4に示す。

$$T = \sum_{i=1}^{N_i} T_i \quad (3)$$

本手法の利点は、対象とする構造物に対して2回の健全度と検査日を得ることができれば(すなわち、式(1)を算出できれば)、平均劣化曲線の算出が可能となることにある。したがって、過去の検査・補修等の情報が不十分な既存の構造物に対して、新しい検査体制で今後維持管理に臨む場合でも劣化予測を行うことができる。

3. 橋梁の目視検査結果を用いた提案手法の妥当性の実証的検討

実測データは、NY市が過去9年間(1992~2000年)に実施した828橋梁に対する目視検査結果を用いる¹³⁾。

3.(1)でNY市の目視検査と健全度評価の概要について述べた後に、3.(2)で橋梁の平均劣化曲線を算出する。さらに、部材の補修等の実施が予測寿命に及ぼす影響についての考察(3.(3))と、個別の橋梁に対する劣化予測(3.(4))を通して、提案手法の妥当性を実証する。

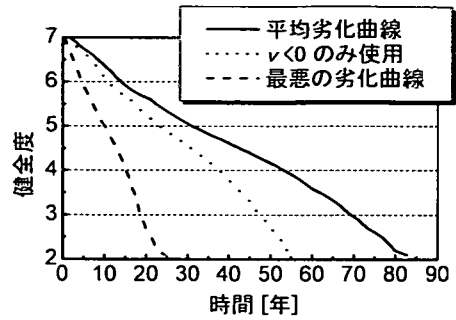


図-5 劣化速度に基づく平均劣化曲線

(1) NY市の目視検査と橋梁の健全度評価の概要¹⁴⁾

2000年時点で、NY市では764橋(計4689スパン、総面積1,430,000[m²])を管理している。それらの平均年齢は約75歳に達する。維持管理は深刻な問題であり、1982年よりNY州の定める橋梁検査マニュアル¹⁵⁾に従って、上部構造25部材、下部構造22部材を対象とした目視検査を実施している。

検査結果は、部材ごとに健全度として7から1の整数値で評価される。数値が大きいほど健全であることを意味する。目視検査は各スパンに対して実施され、同一部材が複数ある場合には複数ある健全度の最低値がスパンの代表値となる。このとき、総合評価である橋梁全体の健全度*r*は、検査対象の全47部材のうち、特に表-1に示す13部材の健全度を用いた重み平均により算出される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{13} w_i \rho_i}{\sum_{i=1}^{13} w_i} \quad (4)$$

式中、 w_i と ρ_i は、*i*番目の部材に対する重みと健全度である。ちなみに、表-1中の13部材の選定や重みは、NY州とNY市が経験に基づいて主観的に決定した。

実際的に、補修等の判断指標となっているのは部材単位の健全度であるが、管理下にある橋梁を資産として管理し、予算投入の必要性和有効性を示すためには橋梁全体の健全度は有効であると考えられる(図-6)。

(2) 橋梁の平均劣化曲線の算出

NY市の目視検査結果への提案手法の適用には、まずNY市の評価手法の独自性に起因する次の2点を考慮して、算出される平均劣化曲線が実際とは異なる予測結果を与える可能性があることに留意する必要がある。①表-1中の重み*w*の小さい部材に対して補修等が実施されても全体として劣化速度*v*>0とならない場合がある。②式(1)で与える13部材それぞれは、同種の部材が複数存在する際にはそれらの健全度のうち、最低値を代表値として式(4)で与えるために、常に同一部材の劣化履歴を捉えている保証はない。

この条件の下で、橋梁の平均劣化曲線を算出する。目視

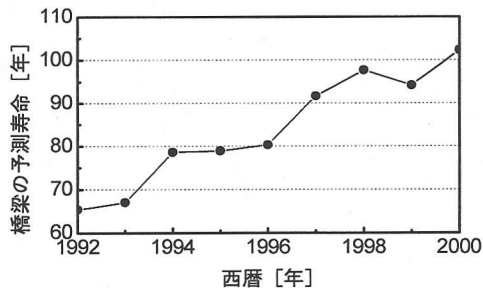


図-6 各年における橋梁の予測寿命の平均値の推移

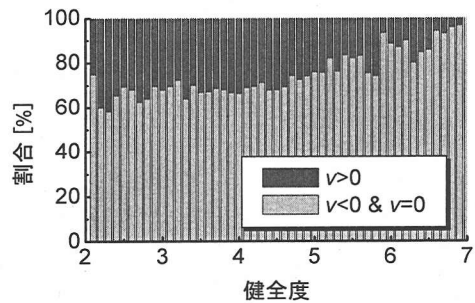


図-8 各健全度における正の劣化速度 ($v > 0$) の割合

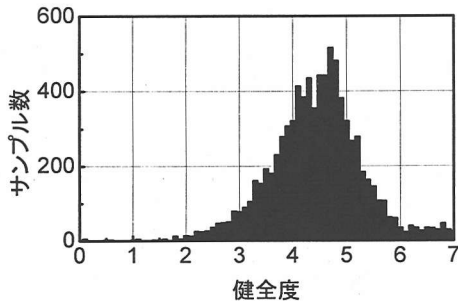


図-7 階級ごとの健全度の分布

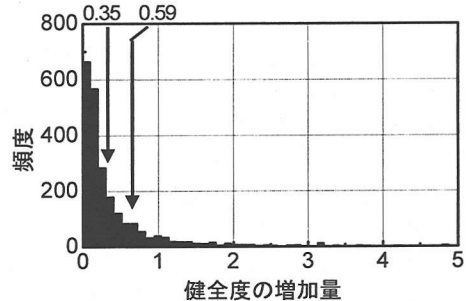


図-9 補修等の実施 ($v > 0$) による健全度の回復量の分布

検査で評価された部材の健全度から式(4)により橋梁全体の健全度を算出し、さらに式(1)により劣化速度を求めた。得られた劣化速度は計 8241 個であった。つぎに、健全度を 0.1 刻みで 7~1 まで計 71 の階級に分類し、式(2)(3)により平均劣化曲線を算出した。平均劣化曲線を図-5 に示す。図中の実線は平均、破線は最悪のケースの劣化曲線である。橋梁の予測寿命を使用限界である 2 に達するまでの年数として定義すると、本解析より予測寿命は平均で約 80 年、最悪の場合には 25 年程度となった。図-3 の実線との比較では、この結果は 20 年程度予測寿命が長いことになる。この理由として、図-3 は 1994 年度の目視検査結果のみを使用しているという根本的な違いがあるものの、図-5 では図-3 で考慮していない $v=0$ を含んでいることがあげられる。そこで、改めて $v=0$ を除外した $v < 0$ のみのケースを同図中に点線で示した。両方の予測結果は整合しており、既存手法との比較において本手法の一応の妥当性を確認することができる。

つぎに、劣化予測の応用例として、適切な維持管理が橋梁の予測寿命に及ぼす影響を考察する。1992~2000 年までの 1 年分の目視検査結果を用いて各年度の劣化曲線を算出し、予測寿命の推移を調べる。ただし、対象年度に健全度が得られていない橋梁はそれ以前の最も新しい年度の健全度で補った。各年度の予測寿命を図-6 に示す。予測寿命は年々増加し、NY 市では適切な維持管理が実施されていることがわかる。これは、補修等の実施による劣化抑制効果が劣化速度の変化として表れていることを

示している。

さらに、構造形式やスパン長、また交通量や融氷剤の分布量といった環境条件の面からも分類することで、構造物の寿命に大きな影響を与える要因を分析することも可能となる¹⁶⁾。しかし、分類が細くなるほど、必然的にサンプル数が減少するので劣化曲線の信頼性が低くなる。実際に今回の解析においても、健全度が低い階級ではサンプル数が極端に少なく(図-7)、サンプル数が極端に異なる結果を同等に扱うことへの信頼性に対しては今後検討を加える必要がある。

(3) 部材の補修等の実施の影響を考慮した平均劣化曲線の算出

図-5 では、補修等の実施の影響と考えられる正の劣化速度 ($v > 0$) を劣化曲線の算出時に除外した。しかし、補修等が実施される橋梁は通常よりも劣化の進行が速いと判断するのが自然であり、このような橋梁の劣化速度を単に計算から除外してしまうことは、現実よりも緩やかな予測結果を与える可能性がある。単一部材に着目して劣化曲線を算出するならば、補修等の実施は健全度が使用限界 2 を下回ったことを意味するはずであるので、使用限界に達するまでの年数に着目した劣化予測の結果に対しては直接的な影響を及ぼさない。しかし、異なる耐用年数を持つ部材の集合体である構造物全体の劣化曲線を算出する際には、構造物全体の健全度が使用限界に達していなくとも部材の補修等が行われるために、予測結

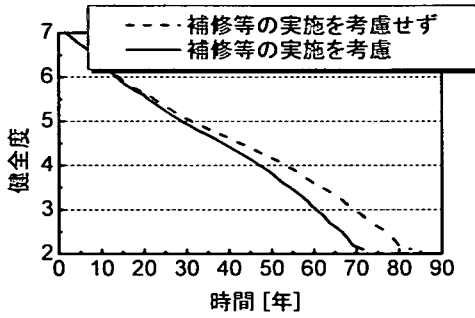


図-10 補修等の実施の影響を考慮した平均劣化曲線

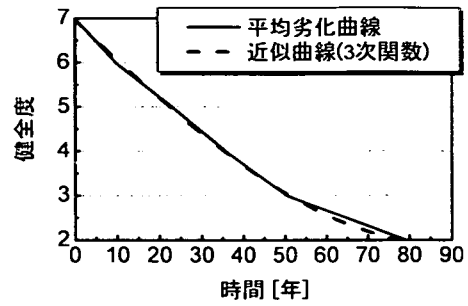


図-11 主部材の平均劣化曲線

果が変化する可能性がある。図-8に、先の健全度に関する71の各階級において $v \leq 0$ 、 $v > 0$ となるケースが占める割合を示した。健全度が高い場合であっても補修等が実施されることが理解できる。

しかしながら、補修等の実施の影響を考慮した平均劣化曲線の算出手法の一般化は難しく、また現実には補修等が実施された後であるので、妥当性を実証することもできない。したがって、以下では今回のケースに対してのみの適用に過ぎないが、橋梁全体レベルと部材レベルからの2つのアプローチによる考察を行った。

a) 橋梁全体レベルからのアプローチ

表-1の13部材を重みの大きさに応じて三グループに分類する。すなわち、橋台、主部材、床版、橋脚を第一グループ、支承、背面壁、擁壁、橋梁台座、2次部材、舗装、添接を第二グループ、それ以外を第三グループとする。第一グループの平均の重みは8.5、第二グループでは5、第三グループでは1.5となる。次に、部材はその健全度が2になったときに補修等が行われ（実際は表-1に示すように部材により異なる）、取替えの場合には、健全度は7まで回復するものと仮定する。このとき、第一グループで取替えが実施されると、橋梁全体の健全度は $8.5 \times (7-2)/72=0.59$ だけ回復し、第二グループでは0.35だけ回復する。それより小さいものに関しては第三グループの取替え、あるいは第一、第二グループの補修・補強であると考え、図-9は、今回の計算に用いた劣化速度の中で $v > 0$ となるケースを抽出して、そのときの健全度の回復量の分布を示したものである。当然ながら、規模が小さい補修ほど、頻繁に行われているが、回復量が0.59以上も数多く存在する。この領域には一度に複数部材の取替えを行ったものも含まれると解釈できるが、ここでは第一グループの取替えと等価であるとして扱った。

一方で、通常、補修等を実施するという事は、次回検査までに健全度が少なくとも1低下する（例えば、現段階で3の健全度が使用限界である2に落ちる）という判断がなされると便宜的に考える。つまり、次回検査時に同じ状態を保っているなら、現段階で補修等に踏み切る

必要はないという解釈である。

第一、第二、第三グループの健全度がそれぞれ1低下すると、先と同様の計算により橋梁全体の健全度は0.12、0.069、0.021低下することになる。このとき、図-9の分布に対して0.59を境界として、0.59を超えて健全度が回復している橋梁($j=1$)には、その階級の平均劣化速度 \bar{v} に、取替えが行われなかった場合に低下していたであろう健全度分 $r_{j1}=0.12$ から算出される劣化速度の平均値を加えて、新たな平均劣化速度 v^* とする。同様に、0.35~0.59の範囲($j=2$)では $r_{j2}=0.069$ を、0.35以下($j=3$)では $r_{j3}=0.021$ を用いる。このとき、階級 i の平均劣化速度 v_i^* を、

$$v_i^* = \bar{v}_i + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{M_{ij}} \left(\frac{-r_{jkt}}{(t_{n+1} - t_n)_{jk}} \right) / M_{ij} \quad (5)$$

($i=1, 2, \dots, N_c$)

として与える。式中、 M_{ij} は階級 i に属する第 j グループの劣化速度の総数である。

算出した平均劣化曲線を図-10の実線で示す。同図中の補修等の実施を考慮しない場合（図-5実線再記）と比較すると、健全度6付近から劣化の進行は速まり、最終的に使用限界に達するまでの劣化時間は約10年早くなるという結論を得た。

b) 部材レベルからのアプローチ

表-1の13部材それぞれに対する平均劣化曲線を算出し、各部材に対する重み平均によって橋梁全体の平均劣化曲線を推定する。

各部材の平均劣化曲線の算出には、1992~1997年までの目視検査結果を用いた。総データ数は部材により異なるが、下部構造は8048、スパンごとに検査が行われる上部構造は約65000であった。これらのデータから式(1)により劣化速度を求め、式(2)(3)より劣化曲線を求める。なお、部材の健全度は整数値で与えられるため、階級数は刻み幅1の7クラスに分類した。健全度が2に達する前に補修等が行われているケースも若干あったが、そのほとんどが健全度の回復量は1であったので取替えでは

表-3 各部材の劣化曲線の3次関数近似 ($u(x)=7+ax+bx^2+cx^3$) と予測寿命

部材番号	a ($\times 10^{-1}$)	b ($\times 10^{-3}$)	C ($\times 10^{-5}$)	予測寿命
1	-1.34	2.31	-2.05	71.0
2	-0.960	1.14	-0.820	86.4
3	-0.914	1.47	-0.954	-
4	-0.674	0.847	-0.616	-
5	-1.01	1.03	-0.363	101.4
6	-0.920	0.197	-0.687	79.4
7	-0.894	0.470	-1.84	69.6
8	-1.21	1.00	-0.149	71.6
9	-1.73	3.25	-2.59	58.4
10	-1.40	1.85	-0.747	79.1
11	-1.29	0.119	-2.49	52.2
12	-1.39	2.28	-1.67	74.4
13	-1.45	2.11	-4.66	41.0

(部材3, 4に関しては健全度3~2でサンプルが得られなかったために、寿命の予測が不可能であった)

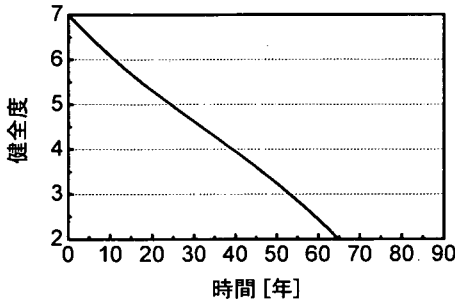


図-12 部材から推定された橋梁の平均劣化曲線

なく、小規模な補修や検査のヒューマンエラーであると考え、計算から除外するだけとした。

一例として、主部材(表-1の部材番号6)の平均劣化曲線を図-11中に実線で示す。平均で予測寿命約80年という結果を得た。一方、点線は最小二乗法を用いて同定した3次関数による近似曲線 $u_6(t)$ である。全13部材に対する近似曲線の係数と予測寿命を表-3に記す。近似曲線から橋梁全体の平均劣化曲線を算出するために、それぞれの近似曲線を1階微分して、一定の時間刻み t ごとに劣化速度 $\dot{u}_i(t)$ を求めた(具体的には $t=1$ とした)。式(4)において ρ を \dot{u} で置き換えて、各時点の橋梁の平均劣化速度を算出する。平均劣化速度 \bar{v} と時間 t が既知であるので、健全度の低下量 L_j を求めることができる。

$$L_j = \bar{v}_j \times t = \sum_{i=1}^{13} w_i \dot{u}_i(t \times j) / \sum_{i=1}^{13} w_i \times t \quad (6)$$

この計算を $7-L_j < 2$ となるまで(使用限界に達するまで)繰り返し、そのときの総時間 $t \times j$ を劣化時間とした。ただし、橋梁全体の健全度が使用限界に到達するまでに、先に健全度1に達した部材に関しては、その時点で取替えを行い、健全度を7に再び戻すこととした。算出した橋梁の平均劣化曲線を図-12に示す。平均の予測寿命は65年で、図-10よりも5年程劣化が早い。この差は、②橋梁全体の健全度は13部材の健全度の平均値となるので、

ある1部材が取替えられたとしても全体としては $v < 0$ となることがあったために生じたと考えられる。

(4) 個別の構造物に対する劣化予測

供用開始前や供用直後の検査実績がない段階で維持管理戦略を決定するためには、全体の劣化傾向を与える平均劣化曲線は有益である。しかし、着目した構造物において検査結果が蓄積された段階では、その履歴を反映し、当初の維持管理戦略を更新していく方が現実的であろう。本節では、劣化速度を確率量として捉え、その確率分布を用いたマルコフ過程に基づく確率論手法を提案する。

a) マルコフ過程に基づく劣化予測手法

任意時点 t_n における劣化速度 v_n は、次回の検査時点 t_{n+1} にはある確率に従って v_{n+1} へ移行すると仮定する。このとき、劣化速度をその大きさに応じて m 個の階級に分類すると、 v_n が属する i 番目の階級から v_{n+1} の j 番目の階級へ移行する過程も同様に確率過程に従うと考えられる。マルコフ過程¹⁷⁾を導入すれば、予測すべき t_{n+1} 時点での劣化速度の階級番号は現時点での階級番号のみに依存し、それ以前の情報には無関係であるとして扱うことができる。このとき、 t_n における劣化速度が階級 i から j に移行する確率を T_{ij} と記述すると、全ケースの確率を遷移行列 T で表すことができる。これより、 t_{n+1} において $1 \sim m$ 番目の階級が選定される確率の集合である m 次の列ベクトル $P(n+1)$ は次式のようなになる。

$$P(n+1) = TP(n) \quad (7)$$

$$P(n+1) = \begin{bmatrix} P_{1,n+1} \\ P_{2,n+1} \\ \vdots \\ P_{m,n+1} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & T_{1m} \\ T_{21} & T_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & \cdots & \cdots & T_{mm} \end{bmatrix}$$

t_n において各構造物の劣化速度とその階級番号をデータとして収集できるため、それらのデータより $P(n)$ を与えることができる。一方、遷移行列 T は、確率変数であ

表-4 目視検査結果から同定した劣化速度の遷移行列

		劣化速度の階級 x_n										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
劣化速度の階級 x_{n+1}	1: 0~0.05	0.678	0.669	0.671	0.629	0.703	0.556	0.769	0.546	0.333	1	0.824
	2: -0.05~-0.1	0.146	0.158	0.135	0.189	0.0946	0.194	0.115	0.182	0.500	0	0.0588
	3: -0.1~-0.15	0.748	0.0846	0.0913	0.0455	0.0946	0.167	0.0385	0.0909	0.167	0	0.0588
	4: -0.15~-0.2	0.0343	0.0313	0.0476	0.0530	0.0541	0	0	0	0	0	0
	5: -0.2~-0.25	0.0236	0.0221	0.0119	0.0303	0	0.0556	0.0385	0	0	0	0
	6: -0.25~-0.3	0.00114	0.0092	0.0159	0.0227	0.0270	0.0278	0.0385	0	0	0	0
	7: -0.3~-0.35	0.0125	0.0055	0.0198	0.0076	0.0135	0	0	0.0909	0	0	0
	8: -0.35~-0.4	0.0052	0.0055	0	0	0	0	0	0.0909	0	0	0
	9: -0.4~-0.45	0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10: -0.45~-0.5	0.0029	0.0018	0	0.0076	0	0	0	0	0	0	0.0588
	11: -0.5~	0.0085	0.0129	0.0079	0.0152	0.0135	0	0	0	0	0	0

表-5 橋梁の目視検査結果

	検査日	健全度	劣化速度
1	1992.3	6.33	-0.163
2	1994.5	5.96	-0.0612
3	1996.4	5.85	-0.137
4	2000.2	5.31	-

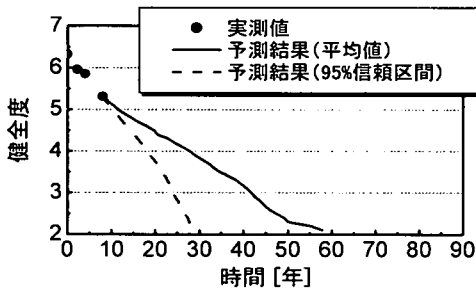


図-13 劣化予測の一例

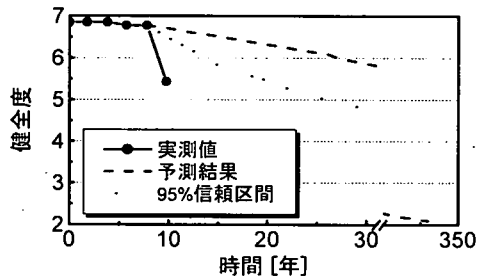


図-14 劣化予測不可能な例

る t_n における階級番号 x_n がある実現値 k を取ったときの t_{n+1} の確率変数 x_{n+1} の条件付き確率分布と考えることができる。さらに、条件付き確率分布は同時確率分布と周辺確率分布へ展開でき¹⁸⁾、次式が導かれる。

$$T = g(x_{n+1} | k) = f(x_{n+1}, k) / h(k) \quad (8)$$

$$h(k) = \sum_x f(x_{n+1}, k) \quad (9)$$

x_n と x_{n+1} の同時確率分布は実測データから同定できるので、 $P(n+1)$ も定まる。最終的に、 v_{n+1} はこの列ベクトル $P(n+1)$ の確率に従って、標本抽出することで選定される。これ以降の劣化予測に関しては、 $n+1$ を n と置き換えて、式(7)を逐次繰り返すことで達成される。

マルコフ過程により構造物の劣化予測を扱った研究は多数あるが、遷移行列を健全度の変化をもとに構成する

ために、時点 t_n で同じ健全度であれば、それ以前の劣化過程が異なっても、 t_{n+1} 以降の劣化は同じ過程をたどることになった。この点に関して、本研究では、実質的に2期前までの情報を考慮した劣化速度をもとに遷移行列を構成するために、健全度の勾配を予測に反映できる。

b) 実測データに基づく劣化曲線の算出

NY市の目視検査結果を用いて、個別の橋梁の劣化予測を行う。橋梁群の目視検査結果から同定された劣化速度の遷移行列を表-4に示す。劣化速度を0.05刻みで0~0.5の11階級に分類したので、遷移行列は11×11次の行列となった。表中数箇所に変化が不連続(ゼロを挟んで値が存在している)な点が存在しているが、本解析では手法の明解さを重視する観点から何ら対処することなしに用いた。しかしながら、各階級に対して正規分布やワイブル分布などの分布形を推定して不連続値を補完するこ

とも考えられる。

一例として、表-5 のような目視検査結果を持つ橋梁に着目する。この場合、具体的には3つの劣化速度 (v_1 , v_2 , v_3) が得られているが、次ステップの v_4 を v_3 により予測することになる。 v_3 は表-4 中で階級3に属するので、式(7)において $P(n)$ は、

$$P(n) = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (10)$$

となる。算出された $P(n+1)$ の確率に従って標本抽出することで劣化速度の実現値を得る。ただし、NY市における目視検査は同じ時間間隔で実施されているわけではないために厳密にはマルコフ過程のモデリングに影響を及ぼすが、本研究では劣化速度を等速であると仮定しているので便宜的に検査間隔は同一であると扱った。同様の手順を逐次繰り返して劣化曲線を求める。今回の場合では2000回の繰り返し計算を行い、劣化曲線の平均値と95%信頼区間を算出した。予測結果を図-13に示す。橋梁の予測寿命は、平均で58年、95%信頼区間で30年という結果が得られた。

つぎに、予測精度について、全体的な視点から検証する。健全度 r_1 , r_2 , r_3 が3回連続で低下している橋梁(劣化速度 v_1 , v_2 は2個得られている)に着目すると、総数328橋あった。328橋に対して現在の劣化速度 v_2 を未知量として、1期前の劣化速度 v_1 から劣化予測を行った。ちなみに、遷移行列は、328橋分の目視検査結果を用いずに改めて同定した。この結果、平均値で67%、95%信頼区間で94%の健全度 r_3 が予測範囲内にあった。

なお、95%信頼区間でも予測できなかったケースに関しては一例を図-14に示す。劣化予測は最後の1点を得られていないものとして行った。その予測結果は、平均で約350年、95%信頼区間でも約220年となっており、現実とは大きくかけ離れている。これは本手法の適用範囲が通常の劣化のみで、事故や災害に起因する突発的な健全度変化は捉えることが難しいことを示している。突発的要因に対して、実務ではリスクの観点から発生確率と被害額を把握しつつ、95%信頼区間外の劣化速度を与える構造物については緊急措置を講ずる体制を整えておく必要がある。

4. 結論と今後の課題

本研究では、LCCAの信頼性向上を目的として、構造物の劣化予測手法について実測データを基にした実証的検討を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

1. 劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出手法を提案した。NY市の目視検査結果への適用においては、既存手法による結果との整合性から本手法の妥当性を

示した。

- 補修等の実施が予測結果に及ぼす影響について、橋梁全体と部材それぞれからのアプローチによる試算を行った。解析結果の妥当性を実証することはできないが、本ケースにおいては補修等の実施の影響を考慮しない場合よりも劣化は速くなる傾向をつかめた。
- 個別の構造物の劣化を予測するために、劣化速度を基にしたマルコフ過程による確率論手法を提案した。事故等の突発的な要因は別として、95%信頼区間を判断基準として劣化予測が可能であることを示唆した。

以上の劣化予測結果を用いることによって、LCCAにおける資本投資時期を合理的に与えることが可能となり、信頼性の向上に貢献すると考えられる。一方、今後の課題としては、劣化曲線の算出時にデータ数が少ない階級における信頼性を明示する手法の提案をあげる。

謝辞：本研究を遂行するに際し、NY市交通局 Bojidar Yanev 博士には、目視検査結果を提供して頂いただけでなく、多大な理解と助言を賜りました。また、コロンビア大学土木工学科 Raimond Betti 教授からは劣化予測に関して有益なコメントを頂きました。ここに記して、感謝致します。

参考文献

- 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案。橋梁と基礎。Vol.31, No.8, pp.64-72, 1997.8.
- 例えば、森杉壽芳編：社会資本整備の便益評価。一般均衡理論によるアプローチ。勁草書房、1997.11.
- 例えば、Dell'Isola, A. J., Kirk, S. J. (千住鎮雄訳)：建物のライフサイクル・コスト分析。鹿島出版会、1987.5.
- FHWA: Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design, FHWA-SA-98-079, 1998.9.
- 貝戸清之、阿部允、公門和樹、藤野陽三：ストック価値を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネジメント。構造工学論文集。土木学会、Vol.47A, pp.991-998, 2001.3.
- 例えば、兼森孝：リスク分析。土木学会誌、Vol.85, pp.13-17, 2000.7.
- Chang, S. E. and Sinozuka, M.: Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk, *Journal of Infrastructure System*, ASCE, Vol.2, No.3, pp.118-126, 1996.9.
- 杉本博之、首藤諭、後藤晃、渡辺忠朋、田村亨：北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について。土木学会論文集、Vol.682/I-56, pp.347-357, 2001.7.
- O'Connor, D. S. and Hyman, W. A.: Bridge Management Systems, Report FHWA-DP-71-01R, FHWA, U.S. Department of Transportation, 1989.

- 10) Hawk, H.: BRIDGIT Deterioration Models, *Transportation Research Record 1490*, pp.19-22, 1995.
- 11) Abed-Al-Rahim, I.J. and Johnston, D.W.: Bridge Element Deterioration Rates, *Transportation Research Record 1490*, pp.9-18, 1995.
- 12) Yanev, B: Life-Cycle Performance of Bridge Components in New York City, *Proceedings of Recent Advances in Bridge Engineering, Advanced Rehabilitation, Durable Materials, Nondestructive Evaluation and Management*, pp. 385-392, 1997.
- 13) New York City Department of Transportation: *1999 New York City Bridges and Tunnels Annual Condition Report*, 2000.
- 14) 貝戸清之: ニューヨーク市における維持管理マネジメントの現状 橋梁と基礎 Vol.36, No.10, pp.37-41, 2002.10.
- 15) New York State: *Department of Transportation: Bridge Inspection Manual-82*, 1982.
- 16) Kaito, K., Abe, M. and Ishi-i, H.: Predicting the Deterioration of Structures Based on Actual Inspection Data, *Proceedings of IABSE Symposium*, Melbourne, Australia, 2002.9.
- 17) 例えば, 赤石沢総光, 吉田郁政, 安田登, 宮本幸始: 性能設計を活用した RC 構造物の保守頻度・時期の最適化に関する研究. 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.277-284, 2001.3.
- 18) 東京大学教養学部統計学教室編: 統計学入門 東京大学出版会, 1991.

(2002.11.13 受付)

PREDICTION OF DETERIORATION OF BRIDGE STRUCTURES BASED ON ACTUAL INSPECTION DATA

Kiyoyuki KAITO, Makoto ABE and Yozo FUJINO

This paper proposes deterioration prediction methods based upon actual inspection data in order to carry out strategic maintenance and to rationalize life cycle cost analysis. Firstly, using deterioration rates, the methodology of predicting the deterioration is discussed to model the averaged deterioration of structures. In the second place, for the prediction of the individual structure, a probabilistic approach using the distribution of deterioration rates and its own historical inspection data is proposed. The validity of these methods is verified through the actual visual inspection data of bridges.