

マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法による PPP の橋梁維持管理への適用の検討

山口大学工学部 学生会員 ○岡本雄作 株式会社エスイー 非会員 大石裕介
山口大学大学院 正会員 江本久雄 山口大学大学院 フェロー会員 宮本文穂

1. 緒論

我が国の橋梁の多くは高度経済成長期に架設され、その多くが高齢化、老朽化しつつある。一方、維持管理に使用できる費用も抑えられており、いかに効率よく効果的に既存橋梁の維持管理を行っていくかが課題となる。その中で、公共事業を官民で連携し、民間企業の資金や技術力、経営能力を活用する考え方 (PPP) を橋梁の維持管理に適用することができないか注目されている¹⁾。しかし、既存橋梁を含む道路事業では、中長期的に民間主導で行う上でのリスクの定量化やノウハウの不足、従来の単年度決済のために、中長期的計画を導入しづらい現状等が挙げられる。本研究では、既存橋梁の維持管理事業に PPP による事業形態を導入する際に課題となる劣化予測手法の検討を行ったものである。すなわち、マルコフ連鎖モデルを用いた既存橋梁の劣化予測手法を提案することによって、PPP 事業における VFM 評価算出の為の従来型事業の財政負担額 (PSC) 設定指標の一つとすることを目的とする。

2. PPP(Public Private Partnership)について

PPP とは、公共サービスの提供や地域経済の再生など何らかの政策目的を持つ事業が実施されるにあたり、官と民が目的決定、施設建設・所有、資金調達などに、何らかの役割を分担して行う公民連携のことである²⁾。

PPP 事業による特徴として、まずリスクを官から民へ相当量移転することが挙げられる。このことにより、民間主導となり、また事業期間においても長期的に民間がリスクを保有することで、長期間に渡り一括で発注することが可能となる。長期間の事業期間を民間主導で行うことで、民間の経営的ノウハウや技術力を駆使しやすい環境となり、最終的に効果的かつ効率的な公共サービスの提供を目指すものである。図-1 に維持管理業務において、従来事業および PPP 事業による定期補修を行った場合の維持管理費用の時間変化を示す。PPP 事業において、一度集中的に補修事業を行い、その後定期的な補修事業を行うことを想定したものである。初期補修により、PPP 事業のほうに一時的に費用が掛かることがわかるが、民間ノウハウを用いた一括管理により、定期補修時のコストを抑えることができれば最終的に PPP 事業が有効であることが期待できることがわかる。

しかし、PPP 事業導入の実現のためには、PPP 事業と従来事業を比較する指標が必要となる。現在用いられている指標として VFM 評価がある。VFM(Value for money)とは、広義の定義として「支払に対して最も価値の高いサービスを提供する」という考え方のことである。しかし、「サービスの価値」を示す指標が不十分であることから、「サービスの価値を同一とした場合の公共による財政負担額の比較指標」として評価が行われている¹⁾。その概念図を図-2 に示す。これより、VFM 評価では、公共管理者にとって、従来方式で自ら事業を実施する場合の財政負担額の見込み額の正味現在価値 (PSC : Public Sector Comparator) と PPP 方式における財政負担額の正味現在価値 (PPP/PFI 事業の LCC) の比較を行うことがわかる。

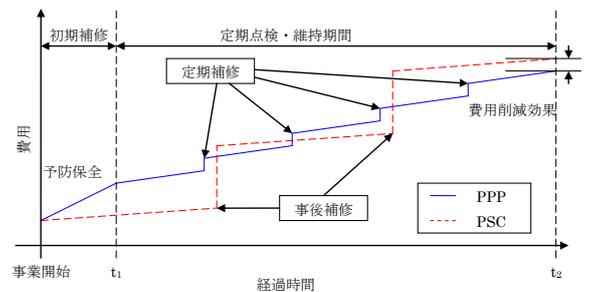


図-1 維持管理費用の時間変化のイメージ

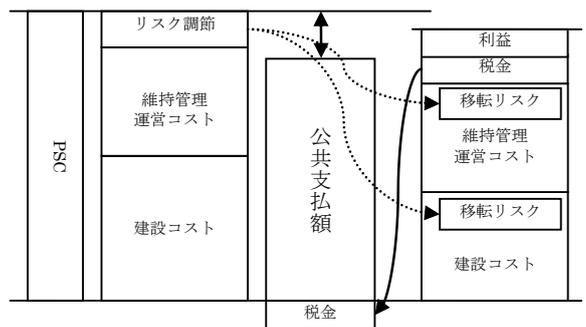


図-2 VFM 評価の概念図

3. マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測について

曲線形式の特徴として独自に開発してきた橋梁維持管理計画策定支援システム内における劣化曲線の算出法に従った曲線を用いる(式-1)。すなわち、既存橋梁の部材の劣化は、材齢が古くなるに従い急速に進行すると考える。このことから、横軸に橋齢、縦軸に健全度をとると、上に凸な形状のグラフになることが予想される³⁾。

$$f(t)_n = b_n - a_n(t - t_n)^c \quad (1)$$

$f(t)$: t 年の健全度(年) n : t 年までに対策を行った回数
 t_0 : 架設時の西暦(年) t_n : n 回目の対策を実施した西暦(年) t : 西暦
 a_0 : 架設時の劣化曲線の係数 a_n : n 回目の対策を実施した時点での劣化曲線の係数
 b_0 : 架設時の健全度 b_n : n 回目の対策を実施した時点での健全度 c : 劣化曲線の次数

ここでは、マルコフ連鎖モデルの性質を用い、上記劣化曲線に近似する曲線を求める。ここで、既存橋梁の劣化を、時間経過により段階的に進行するものとする。このとき、補修を行わない限り良い状態への回復は無いものとする(図-3)。よって、通常の使用環境において、元の状態から次の劣化段階に遷移する場合と、元の状態を維持する二つの状態遷移を考える。

今回用いるマルコフ連鎖モデルは、一つのブロックに収束する性質を持つ。一方で、式(1)で表される劣化曲線は、指数関数を用いていることから、横軸が増加するにつれて負の値に発散する性質をもつ。また、劣化曲線における健全度の範囲は0から100の範囲で表すことから、計算上で劣化曲線と近似するために、考慮する評価点領域だけでなく、負の値を考慮することとした(図-4)。それに対応する状態遷移確率および劣化による各ブロックによる評価点の減点量を決定した。近似させる経過年数を考慮する供用年数を60年とした場合、倍の120年とした。

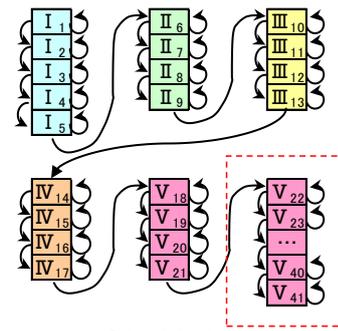
マルコフ連鎖モデルを作成する上で、補修時に想定される状態を考慮する必要があるため、各劣化状態を更に細分化することとした。そこで、図-3に示すように、劣化状態Iを5ブロック、II・III・IVを4ブロック毎に、Vを減点量100までを4ブロック、100以上を20ブロックにそれぞれ細分化した。Vに追加されたブロックは影響曲線状の負の領域を考慮するために追加されたものである(図-3)。マルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測を行う基本式を以下に示す。得られた結果を図-5に示す。

$$f(t) = b - \mathbf{D} \prod_t \mathbf{P} \mathbf{R}_{t_0} \quad (2)$$

このとき、 $\mathbf{D} = (0 \quad \alpha \quad \dots \quad \text{lim})$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1-p_{x1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ p_{x1} & 1-p_{x2} & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & p_{x2} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & 1-p_{x(n-1)} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & p_{x(n-1)} & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{R}_{t_0} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここに $f(t)$: t 年の健全度 t : 西暦(年) t_0 : 基準となる年の西暦(年)
 b : 初年度の健全度 lim : 収束点 \mathbf{P} : 状態遷移確率の行列
 \mathbf{D} : それぞれの劣化状態による減点量を表す行列 p_{xn} : 状態遷移確率
 \mathbf{R}_{t_0} : 基準となる年におけるそれぞれの劣化状態の割合を表す行列



負の領域考慮のためのブロック
 大文字 劣化状態の分類
 小文字 ブロックのナンバー

図-3 今回用いるマルコフ連鎖モデルの考え方

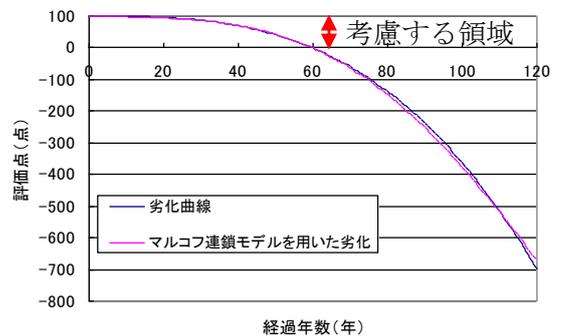


図-4 劣化予測として考慮する計算上の領域の定義

実際に供用している橋梁には、交通荷重や自然条件などの多種の要因の影響がある。このことより、影響曲線は滑らかな曲線ではなく、それぞれの要因が発生するごとにさらに低下していくことが予測される。そこで、今回は既存橋梁に作用する各種要因を想定し、それぞれに対し状態遷移確率を決定し、掛け合わせていくことで劣化予測を行うこととした。既存橋梁に与える影響要因を想定する上で、ここでは以下の3つを考慮した。

1. 通常時の交通荷重による経年劣化
2. 大型車が増えたときの交通荷重による劣化
3. 地震時の影響による劣化

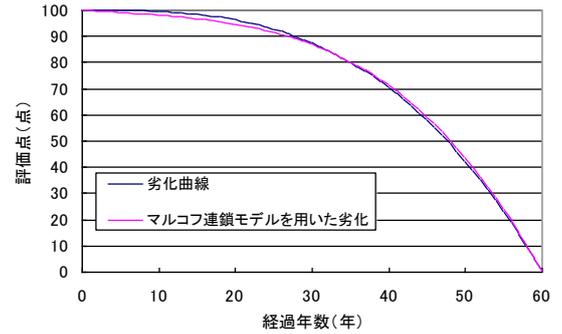


図-5 マルコフ連鎖を用いた劣化予測例

上記それぞれの影響要因による状態遷移確率の行列を決定する上で、通常時の交通荷重における状態遷移確率行列を基準とした。他の影響要因に関しては基準となる行列の確率因子にそれぞれ影響度の大きさを掛け合わせたものを該当する影響要因の確率因子とし、行列を構成する。通常時の交通荷重における状態遷移確率行列を \mathbf{P}_N 、その他の各影響要因における状態遷移確率を \mathbf{P}_x とすると次のように表すことができる。

$$\mathbf{P}_N = \begin{pmatrix} 1-p_{N1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ p_{N1} & 1-p_{N2} & \ddots & & \vdots \\ 0 & p_{N2} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1-p_{N(n-1)} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & p_{N(n-1)} & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_x = \begin{pmatrix} 1-p_{x1} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ p_{x1} & 1-p_{x2} & \ddots & & \vdots \\ 0 & p_{x2} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1-p_{x(n-1)} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & p_{x(n-1)} & 1 \end{pmatrix}$$

このとき、 $p_{xn} = \alpha \times p_{Nn}$ α : 各影響要因の大きさ

とする。以上より、既存橋梁に影響を与える要因を考慮した劣化予測を表した行列式は以下ようになる。

$$f(t) = b - \mathbf{D} \prod_t^t \mathbf{P}_{Et} \mathbf{P}_{Qt} \mathbf{P}_{Nt} \mathbf{R}_{t_0} \quad (3)$$

- ここに $f(t)$: t 年の健全度 t : 西暦(年) t_0 : 供用開始時の西暦(年)
- b : 初年度の健全度 \mathbf{D} : それぞれの劣化状態による減点量を表す行列
- \mathbf{P}_{Et} : 地震が発生した場合の状態遷移確率($\mathbf{P}_{Et} = \mathbf{P}_{震度4t} \mathbf{P}_{震度3t}$)
発生した場合: \mathbf{P}_E 発生しなかった場合: \mathbf{E} (単位行列)
- \mathbf{P}_{Qt} : 大型車の交通量が通常よりも1.25倍増加した場合の状態遷移確率
増加した場合: \mathbf{P}_Q 増加しなかった場合: \mathbf{E} (単位行列)
- \mathbf{P}_{Nt} : 通常の交通荷重に対する状態遷移確率
- \mathbf{R}_{t_0} : 基準となる年におけるそれぞれの劣化状態の割合を表す行列

次に、上述の考え方を適用し、補修を実施した場合の劣化予測を算出する。補修を行うことで、健全度の回復を図ることができる。このとき補修を行った部材は、完全に元の状態に戻るのではなく、元の状態に近い状態であることが想定される。よって、補修を行うことで、劣化状態Iのある段階に引き上げられるものとする(図-6)。このとき、補修後の状態遷移確率については、補修前のものと同じものとする。マルコフ連鎖モデルによって求められた劣化状態とは、劣化を示す各ブロックの存在する割合である。想定した橋梁の条件を表-1、表-2、表-3に、得られた結果を図-7にそれぞれ示す。これより、各種条件においても劣化予測が可能であることがわかる。

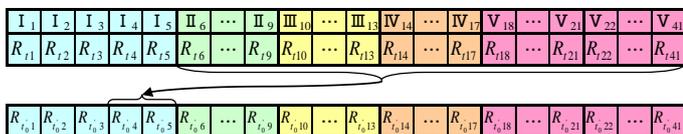


図-6 補修時における状態の操作のイメージ

表-1 劣化要因について

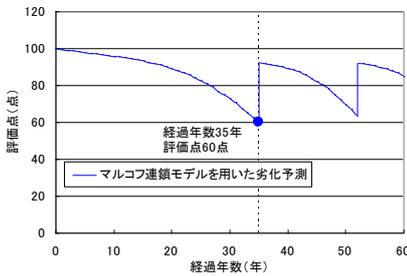
想定する要因	発生する間隔	
通常時の交通荷重による経年劣化	毎年	
大型車が通常よりも増えたときの交通荷重による劣化	一定のパラツキを持たせる	
地震時の影響による劣化	震度3	2年に1度
	震度4	4年に1度

表- 2 既存橋梁の諸条件

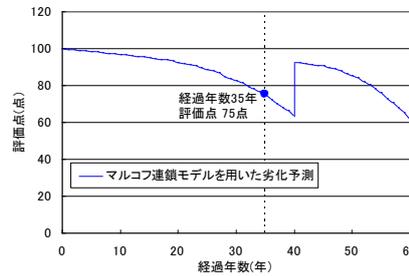
項目	内容
橋長	10m
幅員	6m
橋齢	供用開始35年
事業期間	25年間

表- 3 想定する耐久性

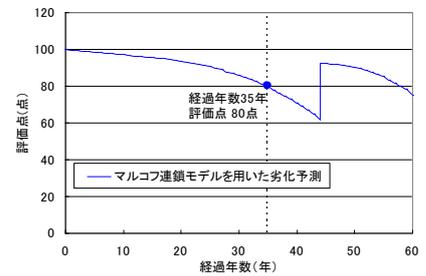
	供用開始35年目において	
Case1	従来事業において補修対象となるもの	(評価点60点)
Case2	従来事業において補修対象として数年余裕があるもの	(評価点75点)
Case3	橋梁そのものが耐久性に優れているもの	(評価点80点)



Case1



Case2



Case3

図- 7 補修後の劣化予測曲線算出の一例

4. 劣化予測曲線の応用

マルコフ連鎖モデルによって得られた劣化の状態は、各状態の割合を示す。そこで、各劣化状態の割合を用いて、補修対象となる面積を算出し、該当する補修工の単価費用を掛け合わせ、合計を求めることで維持管理費コストとした。想定した補修工及び単価費用を表- 4 に示す。算出された劣化予測と費用算出結果を図- 8 に示す。これより、維持管理における事業費の予測が可能であることがわかる。

表- 4 想定した補修工法の一覧

区分	劣化状態	備考	補修工	費用単価 (千円/m ²)
I	健全			
II	ひび割れ	幅0.02mm未満	表面塗布工法	3.7
III	ひび割れ	幅0.02mm以上	表面塗布工法+注入工	5.7
IV	断面欠損	深さ3cmまで	断面修復モルタル工法(はつり無)	62
V	断面欠損	深さ5cm・鉄筋露出	防錆処理工法(はつり有)	106

5. まとめ

供用中の橋梁の多くが更新時期を迎える一方で、道路投資に使用できる費用が抑えられていることから、橋梁の維持管理においていかに効率よく効果的におこなうかが課題となる。そこで民間企業の経営力や技術力を活用する事業形態(PPP)が維持管理業務に適用できないか考えられている。しかし、PPP 事業を適用する上で、確立された費用算出の手法が無いことから、従来事業との正確な比較ができず、導入検討が難しいとされている。そこで、本研究ではマルコフ連鎖モデルを用いて劣化予測手法の提案を行った。得られた結果を以下にまとめる。

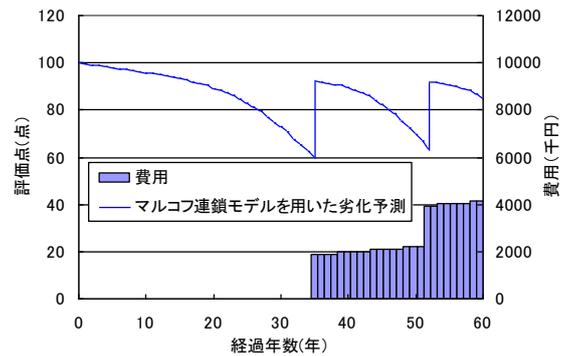


図- 8 劣化予測による補修費用算定の一例

- 1) 劣化曲線とマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測は一定の期間および、負の領域を設定することで近似することが可能である
- 2) 条件設定により、橋梁の劣化要因を考慮した劣化予測を行うことができた。
- 3) 劣化予測に基づいたリスクを含む維持管理費の算出モデルができた。

以上のことから、今回作成した劣化予測手法により、劣化に対する費用予測を行えることから、この二つの指標から VFM 評価に用いる PSC の設定指標として適用の可能性が期待できる。

<参考文献>

1)土木建設マネジメント委員会 PFI 研究小委員会：インフラ整備を伴う PFI 事業形成のための課題の明確化とその解決策の提言に向けて 2003 年度研究報告書, 2004.3.31
 2)大石裕介, 松永徳重, 宮本文穂：Public Private Partnership(PPP)の橋梁維持管理への適用, 社会基盤マネジメントシリーズ No.17, The Research Center for Environmental Safety YMAGUCHI UNIVERSITY, 2012.3
 3)宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人：Bridge Management System(BMS)の開発, 土木学会論文集, No.560/V1-34, pp91-106, 1997.3