

橋梁定期点検により得られた健全度データによる将来の劣化予測検討

協和設計 (株) 村井 茂樹

論文要旨

日本の社会資本は、戦後の高度成長期とともに着実に整備され一定のストックを形成してきた。今後は著しい経済成長が見込めない中で高齢化した社会資本の割合が急速に増加することが予想される。そのため、平成26年に各道路管理者の責任による点検→診断→措置→記録という「メンテナンスサイクル」を確立するために具体的な点検頻度や方法が法令で定められ、各自治体では当年度から法定点検が実施され始めた。

本論文では、ある事務所の橋梁定期点検の結果から得られた損傷の判定区分を健全度という指標に置き換えて、橋梁の劣化を予測し、補修が必要となるタイミングを検討したものである。

キーワード：橋梁定期点検、メンテナンスサイクル、健全度、劣化予測

まえがき

平成29年度に点検を行った当該事務所が管理する橋梁は167橋あり、部材毎に対策区分が判定され橋梁の健全性が診断された状態である。本来の趣旨としては、その診断結果を以て措置に生かすものであると考えるが、本論文ではその結果から将来的な劣化予測ができないかを検討し、補修時期の推定を行うものとする。

1. 健全度の把握

橋梁定期点検によって得られる健全度は、判定区分により以下の通り考えた。

定期点検要領では各部材の判定区分について以下に示す通り9種の判定区分で評価している¹⁾。詳細調査や追跡調査の必要があるS1及びS2を除いて、以下の通り配点を行った。5点(状態が良い)⇔1点(状態が悪い)と考える。

判定区分	判定の内容	配点
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。	5
B	状況に応じて補修を行う必要がある。	4
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。	3
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。	2
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。	1
E2	その他、緊急対応の必要がある。	1
M	維持工事で対応する必要がある。	3
S1	詳細調査の必要がある。	---
S2	追跡調査の必要がある。	---

図-1 判定区分と健全度の読替え

この健全度は部材毎に集計し、劣化予測および橋の健全度の算定に使用する。

2. 劣化予測

(1)劣化予測の方法

本事例では以下の点から、遷移確率による手法で劣化曲線を算出することとした。特徴は

- ・1時点前の劣化状態のみが次の劣化状態に影響するというマルコフ過程の考え方より、次回更新時に新たなデータとしての取り込むことが可能なこと。
- ・遷移確率行列から1年ごとの健全度を算出することにより、部材毎の補修時期を確定的に算出可能なこと。

が挙げられる。

参考に、その他の予測手法²⁾の特徴と当該事務所でも適用する課題を示す。

①寿命設定による手法

【特徴】橋梁部材ごとに寿命を設定し、建設時点あるいは補修時点を「健全」、寿命時点を「要補修」段階として予測曲線を作成する手法。

【課題】・寿命設定の根拠づけが課題。

- ・寿命に至るまでの劣化進行速度の設定が課題。

②劣化予測式による手法

【特徴】劣化メカニズムに応じた理論予測式を使用する手法。(例：中性化の進行予測、塩化物イオン量の予測)

【課題】・予測式を適用できる劣化要因が限定される。
・劣化予測のための調査データが必要である。

③点検結果の統計分析による手法

【特徴】点検結果に対する健全度と経過年の関係を統計分析することで、予測直線または曲線を作成。

【課題】・予測精度は点検データの性質に依存する。

(2)遷移確率による劣化予測手法の概要

遷移確率とは1年ごとの部材劣化状態の推移割合を表すものであり、図-2のようにある時点N年での健全度の部材数の割合は1年前の(N-1)年の劣化状態にのみ依存するという考え方である。

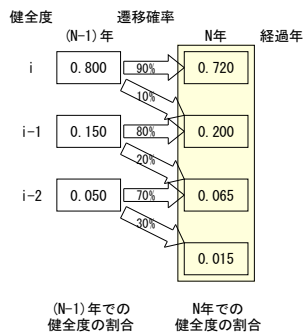


図-2 遷移確率の概念図

劣化曲線の算出には、各劣化状態間の遷移確率から遷移確率行列を求める必要がある。本事例では健全度を5段階評価しているため5行5列の行列式を用いることとする。

行列式は式(1)のように表され、添え字は健全度の推移、例えばP₅₄であれば健全度5が4に推移する確率を示す。

$$P = \begin{pmatrix} P_{55} & P_{54} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{44} & P_{43} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{22} & P_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{11} \end{pmatrix} \dots (1)$$

(3)遷移確率の算出方法

一般的な遷移確率の算出方法は、点検間隔が一定の部材を集計し、その劣化割合で算出するが、本事例では架設時から点検までの間隔はバラバラであるため、同様の手法が使用できない。

本事例では遷移確率年³⁾という考え方によって、以下の条件により算出するものとする。

- ①架設年を1回目の点検と考え、健全度5とする。
- ②点検時の架設経過年を点検間隔と考える。
- ③1年での部材劣化は1ランク以内に限定する。
- ④劣化割合はいかなる年次でも一定と考える。
- ⑤健全度1まで劣化した部材はそれ以上劣化しない。
- ⑥健全度の逆転は考慮しない。

(補修時の点検データは排除する)

以下に、鋼橋主桁の算出例を示す。

表-1 鋼主桁の健全度推移

橋梁名	架設年	今回点検	径間	部材番号	架設年	経過年	架設時健全度	今回健全度
A橋	1967	2017	1	01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
				03	1967	50	5	4
				01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
			2	03	1967	50	5	4
				01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
				03	1967	50	5	3
				01	1967	50	5	4
			3	02	1967	50	5	4
				03	1967	50	5	4
				01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
				03	1967	50	5	3
			4	01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
				03	1967	50	5	3
				01	1967	50	5	4
				02	1967	50	5	4
5	03	1967	50	5	4			
	01	1967	50	5	4			
	02	1967	50	5	4			
	03	1967	50	5	4			
	01	1967	50	5	4			
B橋	1965	2017	1	01	1965	52	5	3
				02	1965	52	5	4
				03	1965	52	5	4
				04	1965	52	5	4
				05	1965	52	5	3
				06	1965	52	5	4
				07	1965	52	5	4
				08	1965	52	5	4
				09	1965	52	5	3
	1965	2017	2	01	1965	52	5	3
				02	1965	52	5	5
				03	1965	52	5	3
				04	1965	52	5	5
				05	1965	52	5	5
				06	1965	52	5	5
				07	1965	52	5	5
				08	1965	52	5	5
				09	1965	52	5	3
C橋	2014	2017	1	01	2014	3	5	5
				02	2014	3	5	5
				03	2014	3	5	5
				04	2014	3	5	5
				05	2014	3	5	5
D橋	1977	2017	1	01	1977	40	5	4
				02	1977	40	5	3
E橋	1984	2017	1	01	1984	33	5	5
				02	1984	33	5	5
F橋	1965	2017	1	01	1965	52	5	4
				02	1965	52	5	4
				03	1965	52	5	4
G橋	1973	2017	1	01	1973	44	5	3
				02	1973	44	5	3
				91	1973	44	5	4
				92	1973	44	5	4
			2	01	1973	44	5	4
				02	1973	44	5	4
				91	1973	44	5	4
				92	1973	44	5	4
			3	01	1973	44	5	4
				02	1973	44	5	4
				91	1973	44	5	4
				92	1973	44	5	4
			4	01	1973	44	5	3
				02	1973	44	5	3
				91	1973	44	5	4
				92	1973	44	5	4
H橋	1981	2017	1	01	1981	36	5	4
				02	1981	36	5	4
				03	1981	36	5	4
				04	1981	36	5	4
				05	1981	36	5	4
			2	01	1981	36	5	4
				02	1981	36	5	4
				03	1981	36	5	4
				04	1981	36	5	4
				05	1981	36	5	4
3	01	1981	36	5	4			
	02	1981	36	5	4			
	03	1981	36	5	4			
	04	1981	36	5	4			
	05	1981	36	5	4			
I橋	1981	2017	1	01	1981	36	5	4
				02	1981	36	5	4
				03	1981	36	5	4
				04	1981	36	5	4
				05	1981	36	5	5
2	01	1981	36	5	4			
	02	1981	36	5	5			
	03	1981	36	5	4			
	04	1981	36	5	4			
	05	1981	36	5	5			
J橋	1982	2017	1	01	1982	35	5	3
				02	1982	35	5	3
				91	1982	35	5	5
				92	1982	35	5	5
K橋	1993	2017	1	01	1993	24	5	3
				02	1993	24	5	4
				03	1993	24	5	4
				04	1993	24	5	4
				05	1993	24	5	4
L橋	1998	2017	1	01	1998	19	5	4
				02	1998	19	5	4
				03	1998	19	5	4
				04	1998	19	5	4
				05	1998	19	5	5
			2	01	1998	19	5	4
				02	1998	19	5	5
				03	1998	19	5	4
				04	1998	19	5	4
				05	1998	19	5	5

【手順1】 遷移確率年の算出

遷移確率年とは、同一の劣化状態にとどまる平均的な年数のことである。表-1のように部材毎に健全度の推移を集計し、同一健全度ごとに経過年の加重平均を求めることにより算出される。

点検時の健全度5の加重平均は

$$\Sigma A=501, N=21$$

$$\Sigma A/N=501/21=23.857$$

ここでΣA：経過年総和，N：部材数

健全度5の部材が健全度5にとどまる平均的な年数は23.857年となる。以下同様の計算で下表を得る。

表-2 遷移確率年集計表

点検時健全度	経過年総和 ΣA	部材数 N	加重平均 ΣA/N	遷移確率年
5	501	21	23.857	23.857
4	2707	67	40.403	16.546
3	722	16	45.125	4.722
2	---	---	---	---
1	---	---	---	---

データの無い健全度1,2の加重平均については、省略する。

【手順2】 遷移確率の算出

先に示した遷移確率年は、部材の劣化状態がその状態にとどまる平均年数を表しており、遷移確率年より速い段階で半分の部材が劣化し、遅い段階でもう半分の部材が劣化すると言い換えられる。

すなわち、健全度5の部材で考えると23.857年が経過した時点で50%の確率で部材が劣化し50%の確率で健全度5にとどまっていると仮定する。

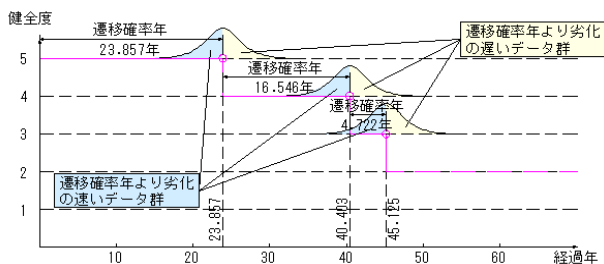


図-3 遷移確率の概念図

式(2)のP₅₅要素は

$$P_{55}^{23.857} = 0.5$$

と表される。これをP₅₅について解くと

$$P_{55} = 0.5^{\frac{1}{23.857}} = 0.971$$

をうる。これを遷移確率という。

P₅₄の要素は健全度5にとどまらない確率と言い換えることができるので

$$P_{54} = 1 - 0.971 = 0.029$$

と表せられる。

以下同様に、各健全度について遷移確率を求める。遷移確率行列は式(3)のように算出される。

$$P = \begin{pmatrix} 0.971 & 0.029 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.959 & 0.041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.863 & 0.137 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{pmatrix} \dots (2)$$

健全度1,2の遷移確率は1.000と仮定

(4)劣化曲線

架設後N年の健全度は下式の赤枠部に示される、健全度割合より算出される。

$$P^N = \begin{pmatrix} P_{55} & P_{54} & P_{53} & P_{52} & P_{51} \\ P_{45} & P_{44} & P_{43} & P_{42} & P_{41} \\ P_{35} & P_{34} & P_{33} & P_{32} & P_{31} \\ P_{25} & P_{24} & P_{23} & P_{22} & P_{21} \\ P_{15} & P_{14} & P_{13} & P_{12} & P_{11} \end{pmatrix}$$

つまり

$$\text{健全度} = 5xP_{55} + 4xP_{54} + 3xP_{53} + 2xP_{52} + 1xP_{51} \dots (3)$$

で、表される。

これにより、鋼橋主桁を例に架設後1年が経過したときの健全度は式(2)および式(3)より

$$\text{健全度} = 5x0.971 + 4x0.029 + 3x0 + 2x0 + 1x0 = 4.971$$

と表される。

以下順次年ごとの健全度を算出すると図-4に示す劣化曲線をうる。

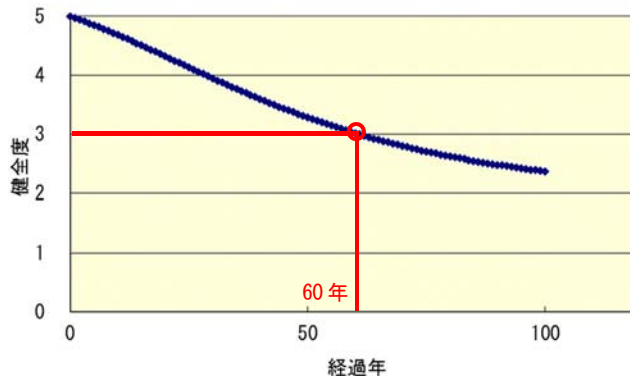


図-4 鋼主桁の劣化曲線

(5)補修時期の推定

上記で得られた劣化曲線については、点検時に得られた健全度データが3までしかないため、2以下の劣化挙動については推定が不可能である。便宜的に健全度2の遷移確率を0%つまり、健全度2まで劣化した部材はそれ以上劣化の進行はないと仮定したことにより、劣化曲線は健全度2に近づくことはあっても、2以下となることはない。ただし、健全度3を指標として次回点検時までには補修を行うことと前提としているため、補修時期を推定するには十分である。

遷移確率を算出する際に得られた、健全度3の遷移確率年の合計は45.125年となり、この年を境に健全度3を下回る部材が50%以上になると予想されている。しかし、実際の劣化曲線は健全度の高い部材に引っ張られて健全度3を下回るのは架設後60年となる。よって、より精度の高い劣化曲線を推定するには、健全度2の遷移確率も設定する必要があると考える。

(6)推定方法

遷移確率年の表からも分かる通り遷移確率年は劣化が進むごとにその間隔が短くなっている。最小二乗法による線形近似ではこの傾向をうまく推定できないため、多項近似により推定すると、52.654年となる。

$$P_{22} = 0.912$$

となる。この遷移確率をもって再度計算すると以下の劣化曲線を得る。鋼主桁に関しては架設後49年で補修の目安となる健全度3となると予想される。

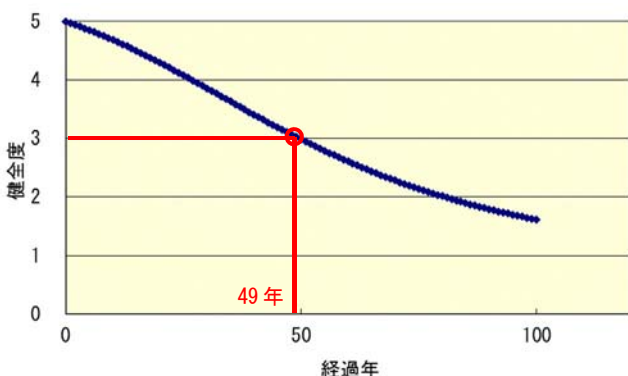


図-5 鋼主桁の劣化曲線(再計算)

あとがき

今後の展望としては、点検データの確実な更新を行い、実工事に伴う補修・補強に関するデータを取得し健全度に反映することや、次回点検時の点検結果を取り入れることにより、より精度の高い劣化予測が可能と考えている。

今後の課題としては、健全度3となった段階で補修が実施されるため、健全度2のデータがなかなか収集されないこと、収集されたとしてもデータ数が少ないため、偏りが出てくるものが挙げられる。これらの課題については、今後橋梁点検業務を進めていくうえで念頭に置いておきたいと考える。

さいごに、本論文をまとめるにあたりご協力いただきました方々には、ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領，平成26年6月
- 2) (社)建設コンサルタンツ協会近畿支部アセットマネジメント研究委員会：アセットマネジメントの普及を目指して，2007.7. pp149
- 3) 竹田俊明・大島俊之・佐藤誠・三上修一：橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討，構造工学論文集 Vol. 51A，土木学会，2005.3