

実測データを用いた構造物の確率論劣化予測手法

(株)BMC 正会員 阿部允
(株)BMC 正会員 貝戸清之

1. はじめに

ライフサイクルコスト解析において資本投資時期の決定は根幹に関わる問題であり、解析結果の信頼性はその決定の合理性に大きく左右される。実測データに基づいた構造物の劣化予測はこの点に対する有効な解決策の一つであり、既に著者らは、構造物全体の劣化傾向の把握を目的とし、劣化速度に着目した予測手法の構築を行った¹⁾。本研究では、次段階として「個別」の構造物の劣化を予測するために、劣化速度を確率量として捉え、その構造物の検査履歴を反映した形での確率論劣化予測手法を提案する。以下では、「健全度」を構造物の健全性の定量的指標、「劣化速度」を異なる時点における健全度の変化率であると定義する。

2. 劣化予測手法

任意の構造物において、現在までに得た健全度を (r_1, r_2, \dots, r_n) 、劣化速度を $(v_1, v_2, \dots, v_{n-1})$ とする。概念を図-1 に示す。 r_{n-1}, r_n が属する健全度の階級が $m-1, m$ であるならば、構造物の劣化予測は、はじめに v_n を予測し、 r_n から階級 m の下限値に到達するまでの時間を v_n より求め、つぎにそれ以降の階級 $(m+1, m+2, \dots)$ ごとに順次予測を行って劣化時間を累和していくことで達成される¹⁾。ここで、劣化速度の予測は、劣化速度を確率量として捉え、健全度に関する階級ごとに得られている確率分布から、過去の劣化履歴を反映させた抽出確率により抽出する条件付き確率問題として表現できる。

仮定は、「将来の劣化速度は、過去に経験した劣化速度よりも遅くなることはない」とする。これは、実際より緩やかな劣化を予測することを避けるという点に配慮している。

この仮定の成立の下で、今、過去の劣化速度が v_{n-1} の1つしか得られていない場合を想定する。便宜上、 v_{n-1} と予測したい v_n の双方ともに確率変数であるとして、 Y, X で表す。一方、図-1 の表に示すような、これらの確率変数の標本分布は、既述のとおり得られた健全度から算出できる。同時に、 v_{n-1}, v_n が健全度に関して、どの階級に属するかについては実現値 r_{n-1}, r_n より判断できる（この場合は m と $m-1$ ）。さらに、 v_{n-1}, v_n が確率変数であるので、それぞれの劣化速度に関する標本分布で属する階級も確率変数とみなし、 y, x と表す。ただし、仮定より $y \geq x$ である。 x, y の確率分布は既知であるから、これより同時確率分布 $f(x, y)$ が求められる。 $Y=v_{n-1}$ と $y=k$ の実現値が得られたならば、 v_n の抽出確率は、次式の条件付き確率により算出できる²⁾。

$$g(x|k) = f(x, k) / \sum_x f(x, k) \quad (1)$$

さらに、過去の劣化速度が $n-1$ 個得られているならば、それぞれに対して式(1)を求める。最終的に過去の全劣化履歴を考慮した v_n の抽出確率 P は、それぞれを現時点からの時間の重み W を用いた重み平均として表すことができる。

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} W_i g(x|k_{n-i}) / \sum_{i=1}^{n-1} W_i \quad (2)$$

3. 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、劣化予測の精度検証を行う。ただし、目視検査に関する詳細は文献1)を参照されたい。階級ごとの劣化速度の抽出確率を表-1に示す。一例として、表-2のような劣化履歴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) から v_4 を予測していくことになる。まず、 v_3 が実現したときの v_4 の条件付き確率を求める。 v_3 に対応する健全度は $r_3=5.85$ であるので表-1の健全度に関する階級2に属する。一方、 v_4 は $r_4=5.31$ で、こちらも階級2に属する。したがって、仮定が成立する条件下で v_{n-1} と v_n の同時確率を算出し、式(1)により条件付き確率を求める。同様の計算を v_1, v_2 について行うことで、最終的な抽出確率を式(2)より算出することができる。さらに、劣化速度の予測を最後の階級まで実施し、橋梁の寿命を予測する。

キーワード：劣化予測，劣化速度，条件付き確率，維持管理，目視検査，橋梁

連絡先：〒261-7125 千葉県美浜区中瀬 2-6 WBG マリブウエスト 25 階 株式会社 BMC，e-mail: kaito@hashimori.jp

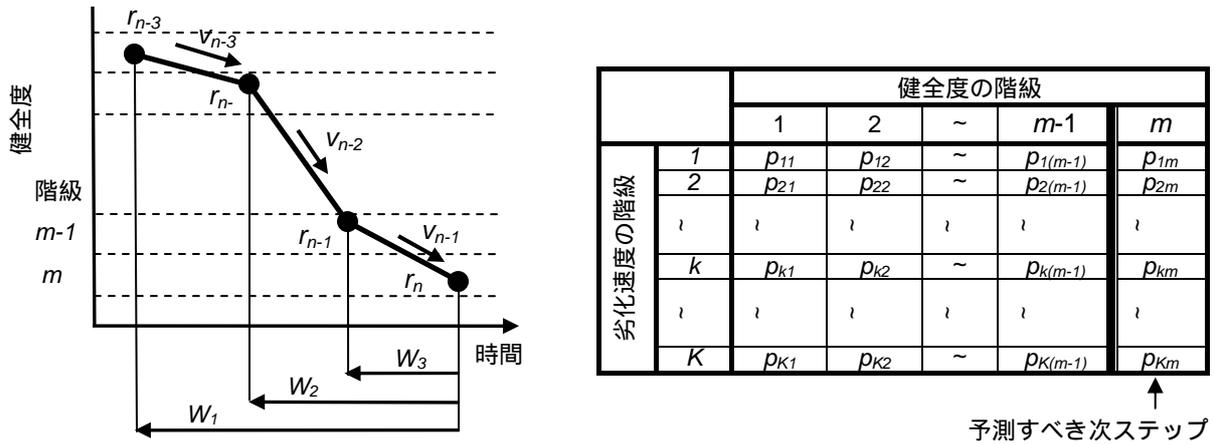


図-1 条件付き確率に基づく劣化予測の概念

表-1 v_{n-1} と v_n の同時確率分布 (v_{n-1} , v_n ともに健全度に関する階級 2 に属する場合)

		劣化速度の階級 (x)											h(y)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
劣化速度の階級 (y)	1	0.268	0.143	0.0916	0.0480	0.0407	0.0218	0.0160	0.0087	0.0058	0.0015	0.0116	0.656
	2	0	0.0759	0.0488	0.0255	0.0217	0.0116	0.0085	0.0046	0.0031	0.0008	0.0062	0.207
	3	0	0	0.0314	0.0164	0.0139	0.0075	0.0055	0.0030	0.0020	0.0005	0.0040	0.0841
	4	0	0	0	0.0086	0.0073	0.0039	0.0029	0.0016	0.0010	0.0003	0.0021	0.0276
	5	0	0	0	0	0.0062	0.0033	0.0024	0.0013	0.0009	0.0002	0.0018	0.0161
	6	0	0	0	0	0	0.0018	0.0013	0.0007	0.0005	0.0001	0.0009	0.0053
	7	0	0	0	0	0	0	0.0010	0.0005	0.0003	0.0001	0.0007	0.0026
	8	0	0	0	0	0	0	0	0.0003	0.0002	0	0.0004	0.0009
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0001	0	0.0003	0.0004
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0001	0.0001
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005	0.0005
g(x)		0.268	0.218	0.172	0.0985	0.0898	0.0499	0.0375	0.0208	0.0140	0.0035	0.0285	1

予測結果を図-2 に示す．解析では，用いた健全度の数を変化させて，予測を行った．健全度を4点用いた場合，寿命は55年，3点では68年，2点では35年である．健全度を3点用いた場合，2点目の緩やかな劣化速度が反映されたために，実際の劣化を捉えることができなかった．しかし，95%信頼区間で評価すると，この他のほとんどのケースにおいても劣化を予測範囲で捉えることができた．なお，予測不可能であった事例を図-3 に示す．劣化予測は最後の1点を用いずに行った．結果は，平均で350年，95%信頼区間でも250年の寿命となり，現実とは大きくかけ離れた．これは，本手法では，事故や災害による急激な健全度変化を捉えることができないことを示唆している．このようなリスクに対する取り扱いは今後の課題としたい．

4. まとめ：個別の構造物の劣化を予測するために，劣化速度の分布に着目し，過去の検査履歴の影響を反映することができる確率論劣化予測手法を提案した．事故等の影響による突発的な要因は別として，信頼区間評価で劣化予測が可能であることを示した．

謝辞：本研究を遂行するにあたり，NY市のヤネフ博士から目視検査結果を提供して頂きました．また，コロンビア大学ペティ助教授には有益なコメントを頂きました．

【参考文献】1) 貝戸，阿部，藤野：劣化速度に着目した構造物の劣化予測，第57回年次学術講演会（予定），2) 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

表-2 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	-

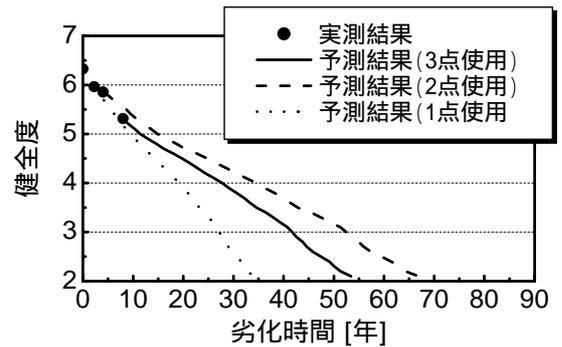


図-2 劣化予測の一例

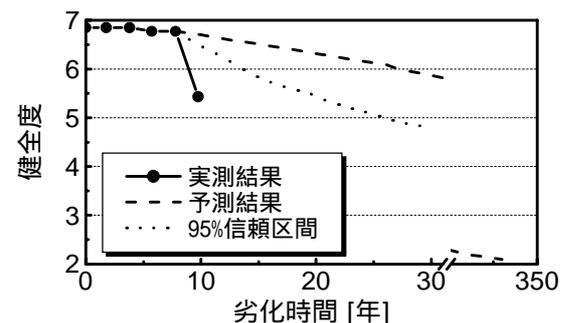


図-3 劣化予測不可能な例