

## 将来の不確実性を考慮した橋梁の最適補修計画について

北海学園大学 正会員 杉本 博之

北海学園大学大学院

学生員 ○齋藤 善之

北武コンサルタント(株)

正会員 阿部 淳一

**1. まえがき** 橋梁維持管理システム(BMS)は、劣化曲線によって将来の劣化予測を行うことで、ライフサイクルコスト(以下、LCC)を最小とする補修順位・補修部位を決定し、最適補修計画を策定するものである。しかし、橋梁の供用性や補修費などは種々の不確実な要因を含んでおり、予測と異なる値に変動する可能性を孕んでいる。そのため、補修計画策定の際には、供用性やコストの変動を考慮する必要があると考えられる。そこで、本論文では供用性およびコストについての不確実性を考慮した橋梁の補修計画に対する基礎的な検討を行うことを目的とする。

**2. 不確実モデルの作成** 本論文では基礎的な検討として、供用性の変動とコストの変動は互いに独立で、それぞれ離散的な確率変数を用いて算定されるものとする。また、不確実モデルにおける供用性とコストの変動率および各変動の生起確率は任意に与えている。各部材における劣化度および補修費の算定には、過去に筆者らが発表しているモデルを用いる<sup>1)</sup>。このモデルを基準とし、本論文では、値が+20%の変動をする場合、値が変動しない場合、値が-20%の変動をする場合の3つの変動率を用いて供用性およびコストの各々の不確実モデルを作成した。よって、本論文では計9通りの組み合わせからなる不確実モデルを用いて、不確実性を考慮することになる。作成した不確実モデルを表-1に示す。表中の数字は、供用性とコストの各変動の組み合わせが生じる確率を表している。

供用性に関する不確実性は、劣化曲線式における耐用年数(架設または最後の補修から劣化度が1になるまでの年度)に変動率を乗じることで、供用性の変動とする。以下に不確実性を考慮した劣化曲線式を示す。

$$r(y) = -3.5 \left( \frac{y-1}{\alpha_i \cdot y_0 - 2} \right)^f + 5 \quad (i=1 \sim I) \quad (1)$$

ここで、 $r(y)$ は $y$ 年度における劣化度、 $y_0$ は耐用年数、 $f$ は劣化曲線の形状係数(本論文では1.0)、 $\alpha_i$ は供用性に関する $i$ 番目の変動率、 $I$ は供用性に関する不確実モデルの総数(本論文では3)を表している。劣化曲線を図-1に示す。図中において、黒色の線は供用性が変動しない場合、青色の線は供用性が+20%の変動をする場合、赤色の線は供用性が-20%の変動をする場合の劣化曲線を示す。実際の劣化度は、式(1)で得られた値を四捨五入し整数化することによって、1~5の5段階の値で評価される。劣化度5は健全な状態、劣化度1は劣化が著しい状態を表し、劣化度2~4はその中間の状態を表す。

コストに関する不確実性は、上述したコストモデルによって算定される各橋梁各部材における補修費に変動率を乗じることで、変動後の補修費を算定し、コストの変動とする。以下に不確実性を考慮した補修費の算定式を示す。

$$C' = \beta_j \times C \quad (j=1 \sim J) \quad (2)$$

ここで、 $C'$ は変動した後の補修費、 $C$ は基準となるコストモデルから算定される補修費、 $\beta_j$ はコストに関する $j$ 番目の変動率、 $J$ はコストに関する不確実モデルの総数(本論文では3)を表している。

**3. 最適補修計画** 本論文では、橋梁群の健全状態および年度予算を制約条件として、不確実性を考慮した上でLCCを最小とする最適補修計画の策定を試みる。一補修計画に対する評価は、2.で示した不確実モデルを用いることにより算定されるLCCおよび橋梁群の健全状態の期待値によって行う。最適化問題は以下のように定義される。

目的関数は、計画年度 $Y$ 年内における総費用の期待値とする。総費用は総補修費とユーザーコスト(以下、UC)との和とする。UCは補修時に伴って発生する橋梁の通行止めによる利用者の時間的損失の総和である<sup>1)</sup>。

キーワード 不確実性、最適補修計画、供用性、コスト、変動率

連絡先 〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1 TEL(011)841-1161

表-1 不確実モデル

		コストに関する不確実性			
		+20%	0%	-20%	
$\alpha_i$	生起確率	0.25	0.50	0.25	
	供用性				
不確実性	+20%	0.25	0.0625	0.1250	0.0625
	0%	0.50	0.1250	0.2500	0.1250
	-20%	0.25	0.0625	0.1250	0.0625

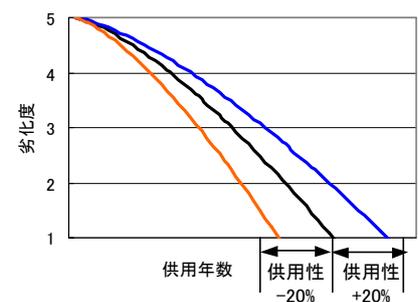


図-1 劣化曲線

$$OBJ = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij} \sum_{y=1}^Y (C_{iy} + UC_{iy}) \rightarrow \min \quad (3)$$

ここで、 $OBJ$ は目的関数、 $P_{ij}$ は供用性が $\alpha_i$ かつコストが $\beta_j$ の変動をする確率、 $C_{iy}$ は供用性が $\alpha_i$ かつコストが $\beta_j$ の変動する場合の $y$ 年度の総補修費、 $UC_{iy}$ は供用性が $\alpha_i$ かつコストが $\beta_j$ の変動する場合の通行止めによる $y$ 年度のUCの総和を表す。

制約条件は各年度における総補修費が各年度予算を上回らないことに加え、各年度における平均橋梁健全度<sup>2)</sup>(以下、BHI)の期待値が0.8を下回らないこととする。以下に制約条件式を示す。

$$C_{iy} - B_y \leq 0 \quad (i=1\sim I, j=1\sim J, y=1\sim Y) \quad (4)$$

$$0.8 - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij} \cdot BHI_{iy} \leq 0 \quad (y=1\sim Y) \quad (5)$$

ここで、 $B_y$ は各年度予算、 $BHI_{iy}$ は供用性が $\alpha_i$ かつコストが $\beta_j$ の変動をする場合における $y$ 年度の全橋における平均橋梁健全度を表す。なお、本論文では予算による制約は行っていない。また、設計変数は各部材の補修年度とし、 $1\sim Y$ の候補を持つものとする。

**4. 計算結果**

ここでは、上述の最適化問題から得られた結果について述べる。対象橋梁は表-2に示す10橋とした。補修の対象とする部材は床版、主桁、橋脚、橋台、伸縮装置、支承、橋面工の7部材とした。また、1部材あたりの最大補修回数を10回としたため、設計変数は700変数となる。対象橋梁群の各部材における計画開始時の劣化度を表-3に示す。表中の「-」は該当部材が存在しないことを示す。計画年度は50年とし、最適化手法にはGA<sup>3)</sup>を用いる。GAのパラメータは人口サイズを400、交叉確率は80%の20点交叉、突然変異は5%、大変異は20回とし、最大1000世代、あるいは大変異の回数を満足した場合を計算の終了条件とした。また、本論文では不確実性の考慮によって生じる変化を見るため、不確実性を考慮しない場合の最適化も行い、比較を行った。以下に、各々の最適化から得られた結果を示す。

不確実性を考慮しない最適化から得られた補修計画(以下、確定的な補修計画)における総費用は4億8068.7万円となった。また、不確実性を考慮した最適化から得られた最適解における総費用期待値は5億3767.5万円と確定的な補修計画と比較して約12%増加した。表-4、表-5に劣化度別の補修回数を示す。表-5から、同じ補修計画でも供用性がマイナスに変動すると劣化した状態での補修が増え、プラスに変動すると健全な状態での補修が多くなることが分かる。また、表-5における供用性が変動しない場合と表-4を比較すると、不確実性を考慮した場合は劣化度2における補修回数が減少し、劣化度3および劣化度4における補修回数が増加し、かつ全体的な補修回数が多くなっており、不確実性を考慮した場合の方が補修の間隔が短くなっていることが分かる。このように、不確実性を考慮した補修計画では補修間隔を短くし、健全な状態に保つことで供用性の変動による劣化のずれに対応する傾向が見られた。また、確定的な補修計画に対して表-1を用いて不確実性を考慮すると、総費用期待値は13億8698.1万円にまで増大した。また、BHI期待値の値も低下し、制約条件を満たさなくなった。この結果は、確定的な補修計画の変動に対する脆弱性を示した結果であり、不確実性を考慮する必要性を示した結果でもある。

**5. まとめ**

本論文では供用性およびコストについての不確実性を考慮した上で、LCCを最小とする最適な補修計画の策定を試みた。本論文では対称橋梁数を10橋とし、1つの不確実モデルについての計算結果を示したが、今後はより多くの不確実モデルを用いて、さらに対象橋梁数を増やして検討を重ねていきたいと考える。

**参考文献**

1) 杉本, 赤泊, 中野, 渡邊: 北海道の橋梁の補修費計算モデルの構築と最適維持管理計画について, 応用力学論文集 Vol.6, pp.1121-1130, 2003. 2) 大島, 三上, 山崎, 丹波: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.201-217, 2001. 3) 杉本, 鹿, 山本: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.

表-2 各橋梁の諸元

橋梁番号	橋梁形態	径間数	橋長 [m]	主桁高さ [m]	有効幅員 [m]	橋台・橋脚高さ[m]	主桁本数	UC [1000円/日]
1	2	1	36	1.7	25	9.6	5	4980.6
2	3	3	94	1.8	9	16.3	4	1216.8
3	1	1	21	0.93	11	6.8	5	239.4
4	7	1	20	0.75	16	8.1	22	3907.8
5	4	2	55	1.73	11	7.2	6	1692
6	1	5	146	1.44	14	8.6	7	1305
7	1	1	20	1.28	10	11.4	5	2602.8
8	7	1	20	0.7	16	7.6	24	480.6
9	7	3	27	0.58	22	5.8	1	226.8
10	6	2	46	0.71	9	11.6	1	457.2

表-3 各部材の初期劣化度

橋梁番号	床版	主桁	橋脚	橋台	伸縮装置	支承	橋面工
1	3	3	-	5	4	5	5
2	5	5	5	5	5	5	5
3	5	5	-	5	5	5	4
4	-	5	-	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
6	5	5	5	5	5	2	3
7	5	5	-	5	5	4	4
8	-	5	-	5	5	5	5
9	-	5	5	5	5	5	5
10	-	5	2	2	2	5	4

表-4 劣化度別補修回数 (確定的)

劣化度	1	2	3	4	計
補修回数	0	5	96	171	272

表-5 劣化度別補修回数 (不確実性を考慮)

劣化度	1	2	3	4	計
補修回数	0	4	76	186	266
供用性+20%	0	4	102	178	284
供用性-20%	1	14	159	137	311