

劣化進行の不確実性を考慮する補修計画最適化問題定式化の改良について

北海学園大学大学院 正会員 ○齋藤 善之 北海学園大学 正会員 杉本 博之

1. まえがき 橋梁維持管理システムでは、将来の劣化予測を行うことで LCC を最小とする最適補修計画の策定を行う。しかし劣化には種々の不確実な要因が含まれていることから、劣化予測において不確実性を考慮する必要があると考えられる。そこで北海道の橋梁点検データを元に作成した劣化曲線群¹⁾を用いて、設計変数を補修年度としてモンテカルロ法による期待値によって補修計画を評価する最適設計問題(問題 A)の最適化を試みたが、最適解を得るまでに長時間の計算時間が必要となり実用的とは言えない結果となった。そこで定式化を改良し、設計変数を補修レベルおよび点検間隔とした最適設計問題(問題 B)の最適化を試みた。この問題では 1 橋梁毎に確率パラメータの全組み合わせを事前に計算し、橋梁群に対してはそれらの統計的な和をとることで計算時間の短縮を図った。本論文ではこの 2 つの最適設計問題について比較を行い、定式化の改良による効果の確認を行う。

2. 劣化曲線群 不確実性を考慮するための劣化モデルとして、北海道の橋梁点検データから劣化曲線群を作成した。劣化曲線群は生起確率を持つ複数の劣化曲線から成り立ち、各橋種(鋼橋、コンクリート橋)の部材ごとに作成する。なお本論文では LCC 算定の対象部材は床版、主桁、躯体、伸縮装置、支承、橋面工の 6 部材としている。図-1 に 5 本の劣化曲線から成る劣化曲線群を示す。図中の健全度 $r(t)$ は供用年数 t 年における部材の健全さの程度を表す値であり 5 が健全、1 が最も劣化した状態を表す。また T_m は曲線 m の耐用年数を表し、供用年数 t が $t \geq T_m$ の条件を満たしたとき、健全度 $r(t)=1$ となる($m=1 \sim 5$)。なお本論文では曲線 m の生起確率 P_m の値を $P_1=0.1, P_2=0.2, P_3=0.4, P_4=0.2, P_5=0.1$ として作成した劣化曲線群を用いた。耐用年数等に関しては文献 1) に詳しい。

3. 最適化問題の定式化 設計変数の異なる 2 種の最適設計問題で劣化進行の不確実性を考慮した最適補修計画の策定を試みた。どちらの問題においても目的関数式および制約条件式は以下に示す共通の式を用いている。

目的関数は次の式で表される。

$$OBJ = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C_{it} \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、OBJ は目的関数、I は橋梁数、T はライフサイクル期間、 C_{it} は橋梁 i の t 年度における総費用期待値を表す。

制約条件は以下の式で表される。

$$\sum_{i=1}^I C_{it} + \sigma_t - B_t \leq 0 \quad (t=1 \sim T) \quad (2)$$

$$P_i^{\max} - P^* \leq 0 \quad (i=1 \sim I) \quad (3)$$

ここで、 σ_t は t 年度の総費用の標準偏差、 B_t は t 年度の年度予算、 $P_i^{\max}$ は橋梁 i において 11 年目以降に健全度が 2.5 を下回る確率の全部材中の最大値、 P^* は健全度が 2.5 を下回る確率の制約値を表す。

設計変数について、問題 A では橋梁 i における部材 j の k 回目の補修年度 $t_{rijk}(i=1 \sim I, j=1 \sim J, k=1 \sim K)$ を設計変数とした²⁾。ここで、J は部材数を表す。なお最大補修回数 K は 15 回としている。問題 B では、橋梁 i の補修レベル h_i および点検間隔 s_i を設計変数とした($i=1 \sim I$)。補修レベルとは点検を行った際に補修を実行する健全度の基準値を指す。これらの設計変数の候補値を補修レベルは 0.5 刻みで 2.5~4.0 の 4 通り、点検間隔は 2~9 年の 8 通りとした。

4. 問題 A 問題 A では劣化曲線群から適用する劣化曲線をランダムに選択し LCC を算定するといった試行を複数回繰り返すモンテカルロ法によって期待値を算定する。本論文では総試行回数を 1000 回、ライフサイクル期間を 50 年、対象橋梁を 10 橋、年度予算 $B_t=1000$ [千円/橋]($t=1 \sim T$)、 $P^*=12\%$ として計算を行った。また最適化には GA を用い、人口サイズ 500、交叉確率 80%、突然変異 5%、最大 1000 世代として最適化を行った。最適解における総費

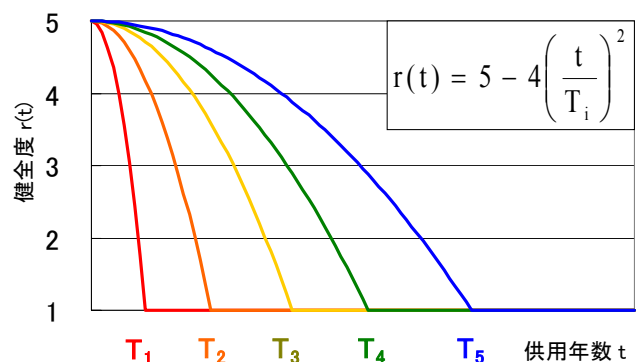


図-1 劣化曲線群

キーワード 不確実性, 劣化曲線群, データベース, 補修レベル, 点検間隔

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

用の期待値と標準偏差および部材毎の健全度期待値の年度推移を図-2の(1)に示す。ライフサイクル期間内に発生する総費用期待値は2億1619万円となった。ここで計画終盤の総費用と健全度に注目すると、47年目以降には補修が一切行われておらず、そのために健全度が低下している。これはLCC最小化の概念の下、補修費の抑制を図っているために生じた現象である。また、この問題では最適解を得るまでに25時間もの時間を要した。これはモンテカルロ法によって期待値を算定するため各世代の1線列ごとに1000回のLCC計算を行う必要があり、最適解を得るまでに計5億回ものLCC計算を行っていることに起因する。

5. 問題B 問題Bではあらかじめデータベースを作成し、これを用いて最適化段階におけるLCC算定回数を0回とすることで計算時間の短縮を試みた。データベースは1橋梁毎に設計変数の各々の組み合わせに対して、劣化曲線の全ての組み合わせの下で算定したLCCに生起確率を掛け総和して期待値を算定することによって作成する。この手法は問題Bでは1橋梁当りの設計変数の全組み合わせ数が32通りと少ないために採れる手法であり、全組み合わせ数が 6.5×10^{146} 通りにもなる問題Aへの適用は不可能である。なお、実際に対象橋梁10橋のデータベースを作成したところ、要した時間は約15分程度であった。

ライフサイクル期間、対象とする10橋は問題Aと同様とし、年度予算 $B_t=800$ [千円/橋]($t=1 \sim T$)、 $P^*=5\%$ として計算を行った。また最適化にはGAを用い、人口サイズ1000、交叉確率80%、突然変異5%、最大20000世代として最適化を行った。その結果、最適解を得るまでに要した時間は24秒と問題Aと比べて非常に短い時間で最適解を得ることができた。得られた最適解における総費用の期待値と標準偏差および部材毎の健全度期待値の年度推移を図-2の(2)に示す。ライフサイクル期間内に発生する総費用期待値は1億8167万円と、問題Aより16%低い値となった。また問題Bでは常に一定のルール下で補修が実行されるため、計画終盤でも補修が行われており健全度の低下は見られない。最適解における10橋の設計変数の分布を図-3に示す。図中の緑線は補修レベル、赤線は点検間隔の平均値を表す。図から分かるように、得られた最適解は全橋梁の補修レベルが4.0、点検間隔は3年~4年と、強い予防保全型の補修計画となった。

5. まとめ 本論文では劣化曲線群を用いた最適化により不確実性を考慮した最適補修計画を策定するにあたって、問題Aから問題Bへ定式化を改良した。その結果、計算時間を大幅に短縮することが出来、かつ高品質な解を得ることが出来た。またライフサイクル期間終了後の維持管理を考慮すると、終盤で健全度が低下する問題Aより低下しない問題Bの方が好ましい。なお本論文の予算に関する制約条件では計画初期には制約を行っていないが、実際には予算内で補修を行うことが求められる。今後はこの点について改善し、より現実的な手法にしたいと考える。

参考文献 1) 齋藤, 木内, 杉本: 劣化進行の不確実性を考慮した橋梁の最適補修計画について, 木学会北海道支部論文報告集 第66号 A-39, 2010 2) 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.

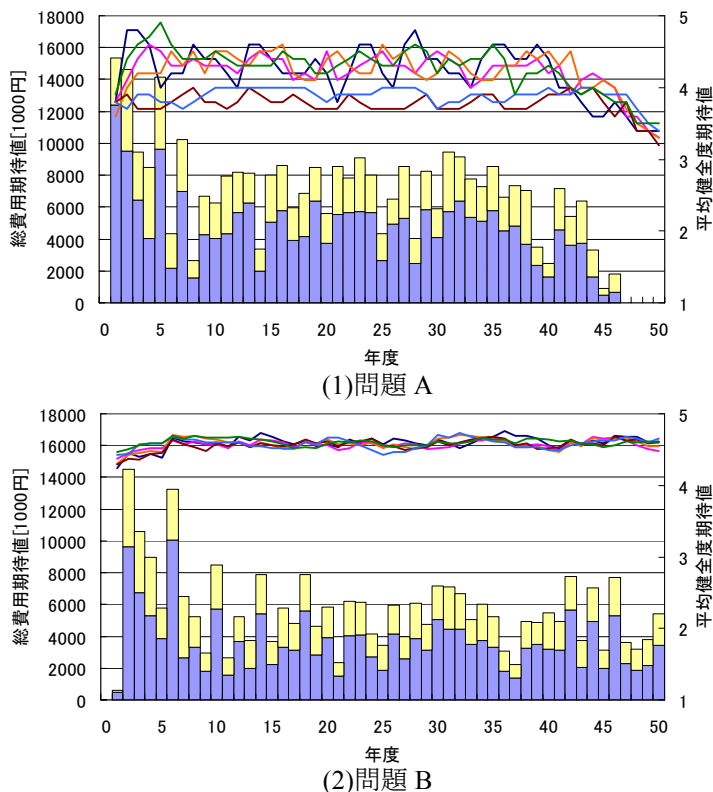


図-2 最適解の比較

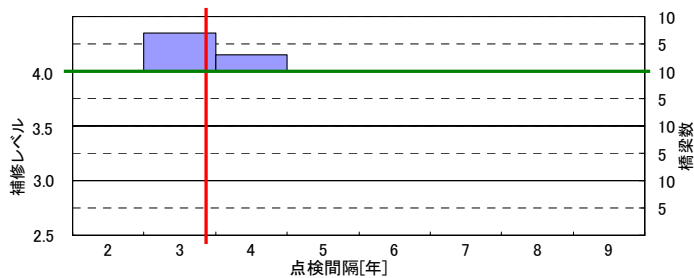


図-3 問題Bの最適解における設計変数の分布