

確率過程に着目した道路橋の維持・更新

東京工業大学大学院 学生会員 ○木本 由花
東京工業大学大学院 正会員 上田 孝行

1. はじめに

今日、我が国には膨大なインフラが蓄積しており、それらは建設後数十年が経過し、耐用年数を過ぎ、維持・管理が必要になってきている。この維持・管理に用する費用は、増加する傾向にあり、この先の将来においても維持・管理費用の増加が続くと見込まれる。このことから、インフラの維持・管理に関して合理的なマネジメントを行っていくことが重要である。

本研究ではインフラの維持・更新に関連して、補修を行う際に、インフラの損傷度がどの損傷レベルにあれば実施すべきかを考え、最適な補修レベルを導出するモデルの構築を目的とする。

対象として道路橋の支承部を考える。

インフラの劣化に影響を及ぼす劣化駆動力が不確実性をもつ場合は、将来の劣化状態が現時点では確定的には分からない。この不確実性を扱うために、確率過程を導入して、インフラの劣化進行過程を考える。劣化は図1のような4段階の離散的状態に分類されるとし、補修パターンはそれに対応して3パターンを想定する。

本研究では3つのアプローチで分析を行う。方法1として純便益比最大化を、方法2として等価同一の1年あたりの費用（EUAC）を、方法3として確率的動的計画法を考える。

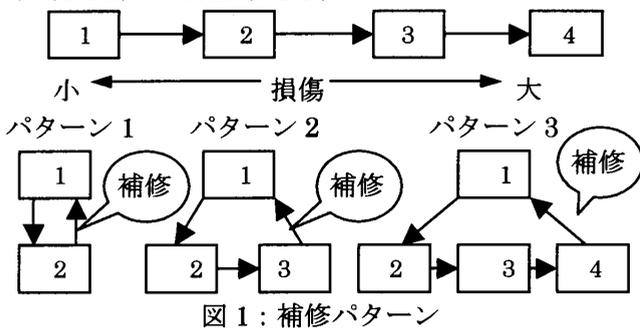


図1：補修パターン

2. 本研究の状況設定

橋の損傷進行過程を吸収マルコフ連鎖に従うとする。単位大型車交通量が通過後に、損傷レベル*i*か

キーワード 確率過程, インフラ, 補修

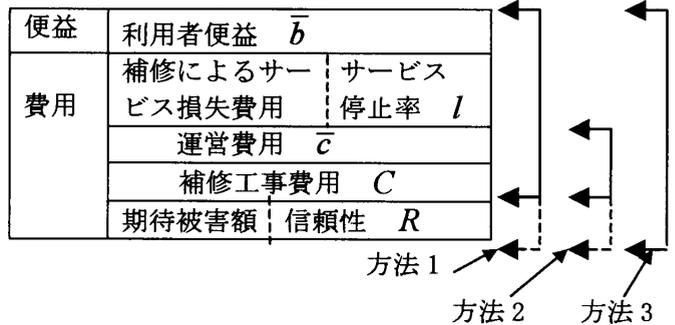
連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

ら*j*に移行する遷移確率を P_{ij} とすると、遷移確率行列は(1)で表される。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、表1で示される便益と費用を考える。

表1：便益と費用



計算を行う際の数値設定は田淵(2001)に従って、以下のように定める。

・ 単位大型車通過後の遷移確率行列

$$P = \begin{bmatrix} 0.9549 & 0.0451 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9768 & 0.0232 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9866 & 0.0134 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表2：支承の損傷状態と補修費用

| 損傷度 | 損傷状況 | 補修費用 (万円/1箇所) |
|-----|--------------------------------|---------------|
| 1 | 0. K. | |
| 2 | 沓座コンクリートに 0.2-0.3 mmのひびわれ | 30 |
| 3 | ローラーの破損、沓座コンクリートに 0.3 mmのひびわれ | 90 |
| 4 | 上沓または下沓の破断 沓座コンクリートに著しい欠け落ち | 150 |

- ・ 毎年の運営費用 140 (万円)
- ・ 利用者便益 (100万台あたり) 66774 (万円/1年)
- ・ 社会的割引率 4%
- ・ 補修工事期間 0.05 (日/1箇所)

3. 純便益比最大化による補修戦略

3.1 計算方法

方法1である社会的純便益比最大化による最適な補修戦略では、(2)式を最大にする補修時の損傷レベ

ルが、最適な補修時の損傷レベルということになる。

$$\begin{aligned} \text{社会的純便益比} &= \frac{\text{ライフサイクルベネフィット}}{\text{ライフサイクルコスト}} \\ &= \frac{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} (A_i \times B_i)}{\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} \times C_i} \quad r: \text{割引率} \quad A: \text{アベイラビリティ} \quad (2) \end{aligned}$$

3.2 計算結果

地震による期待被害額を考慮しない場合には、最適な補修時の損傷レベルは 4 となり、期待被害額を考慮した場合には最適な補修時の損傷レベルは 2 となる。

4. 等価同一の 1 年あたりの費用による補修戦略

4.1 計算方法

方法 2 である等価同一の 1 年あたりの費用 (EUAC) (VAJPAYEE (2001) を参考) による最適な補修戦略を考える際、パターン 3 の場合を defender、パターン 2 を challenger₁、パターン 1 を challenger₂ というように置く。最適な補修戦略は、defender と challenger の EUAC を比較して、(3) 式が最小となるようなパターンが、最適な補修時の損傷レベルを決定することになる。

$$EUAC_{total} = \left\{ \frac{(1+r)^T}{1+(1+r)+\dots+(1+r)^{T-1}} \right\} \times \left[b + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} \times C_t \right] \quad (3)$$

T : 分析期間 r : 割引率

4.2 計算結果

結果は 3.2 と同じになる。

5. 確率的動的計画法による補修戦略

5.1 計算方法

インフラマネジメントは、劣化状態が時間とともに変化していく中で、補修を行うかどうかを逐次に決定していかなければならない問題であることに注目する。そこで、次の最大化問題を解くことを考える。

$$\begin{aligned} \max_{u(t) \in U} NPV(0, T) \\ = E_{Y(0)} \left[\sum_{t=0, \dots, T-1} \beta^t \left\{ \sum_{i \in S} \{ b(Y_i(t), u_i(t)) - c(Y_i(t), u_i(t)) \} + \beta^T \sum_{i \in S} V(Y_i(T)) \right\} \right] \\ \text{s.t. } V(Y_i(T)=1) = V_i^T = \text{given for each } i \quad Y(0) = \text{known} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 $u(t)=1$ は補修を実施、0 は見送りとする。 $Y_i(t)=1$ は損傷状態が i にあるとき 1、それ以外ときは 0 である。また、 $\{ \}$ は次のようになる。

$$\{ \} = \bar{b}h(R_i - l_i u_i) - \bar{c} - C_i u_i$$

最適な補修戦略は、(5) 式のベルマン方程式 (Judd (1998) を参考) を解くことにより求められ、任意の時点におけるそれぞれのインフラの損傷状態において補修を行うか否かの決定がなされる。

$$\begin{aligned} V(Y_i(t)=1) &= \max_{u(t) \in \{0,1\}} (\bar{b}R_i h(t) - \bar{c}) - (\bar{b}l_i h(t) + C_i) u_i(t) \\ &+ \beta \sum_{j \in S} \left[\{ (1-u_i(t)P_{ij}(\phi(t)) + u_i(t)P_{i,i+1,j}) \} V(Y_j(t+1)=1) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

5.2 計算結果

本研究では 2 で示したパラメータを基準として、それらを様々に変化させて (5) 式で表されるベルマン方程式を解いた。補修サイクルにおける 3 つの例を図 2~4 に示す。

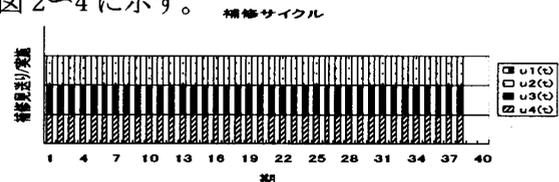


図 2: 補修サイクル 1

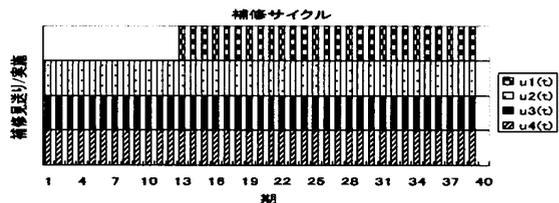


図 3: 補修サイクル 2

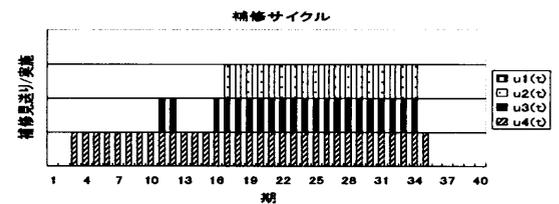


図 4: 補修サイクル 3

補修サイクル 1 は交通量伸び率が 0 の場合で、サイクル 2 は伸び率が 0.06 の場合、サイクル 3 は工事費が増加した場合である。

6. 考察

- ・交通量が伸びずに一定である場合は、図 2 のようにどの期においてもレベル 2 の損傷度であれば補修を行うというルールが導出される。
- ・図 3 のように交通量が伸びると、将来のある時点からはレベル 1 であっても補修を行うというルールが現れる。
- ・補修費用が増加すると、損傷が小さいレベルで頻繁に補修を行うことは効率的でないため、当初はレベル 4 のように損傷が大ききな場合のみ実施するルールになる。ただし期が進むと、損傷が小さいレベルでも補修を行うルールが現れる。

[参考文献]

- ・田淵広嗣：LCC に基づく鋼橋のメンテナンス戦略、東京工業大学大学院土木工学、修士論文、2001。
- ・S. KANT VAJPAYEE：Fundamentals of Economics for Engineering Technologists and Engineers, 2001。
- ・Kenneth L. Judd：Numerical Methods in Economics, 1998。