

補修・更新を考慮した構造物の経済設計

東京工業大学 学生会員 ○山田直樹

東京工業大学 正会員 上田孝行

1. 研究の背景と目的

我が国では第二次世界大戦後の復興や高度経済成長期において道路、トンネル、橋梁、港湾など大量の社会資本構造物が作られてきた。現在、これら大量に建設された構造物の老朽化が懸念されてきている。それにとともに、これら構造物の維持補修・更新費の増加が一段と増加してきている。したがって、将来に向けて既存の構造物の重要性は高まり、さらに、今までは初期建設費に比べて見落とされがちであった維持補修・更新費へ目を向けることが重要である。また、平成14年に道路橋やコンクリートの示方書が改定になったことにより今までの仕様設計から性能設計へと設計方針が変わった。そのため設計段階における自由度が格段に大きくなった。しかし既往研究などでは、構造物の維持補修・更新を考えるうえで設計段階まで考慮して議論をしているものは少ない。そのため本研究では、構造物の維持補修費や補修のタイミングなどが設計段階での様々な選択によってどのように影響されるのかを考え、構造物の資産価値を最大にする最適な設計を導出するモデルの構築を目的とする。

2. 社会資本の維持管理戦略

現在考えられている社会資本の維持管理戦略 [1] には大きく分けて2つのものがある。ひとつは、Corrective Maintenance(CM)であり、もうひとつは、Preventive Maintenance(PM)である。

CMとは、実際に構造物が壊れたり、損傷、腐食が生じた後に即時的に補修、取替え等の処置を施す維持管理戦略である。また、PMとは、実際に構造物の状態を観察・点検を行いながらその時々状態に応じて、予防的に補修、修繕を行い構造物の損傷、腐食が起こるのを未然に防ぎ、構造物の長寿命化や維持管理コストの低減などを旨とする維持管理戦略である。本稿では地震時の破損はCMによって対応するものとし、疲労や腐

食による劣化にはPMで対応するものとする。また、PMは構造物の資産価値を最大にする確率的制御問題のフレームで内生的に導出されるものとする。

3. 地震によるリスク

地震によるリスクの損失期待値 C_{Er} は地震による損傷時コスト C_F と年損傷確率 P_F を用いて以下のように表される。[2] $C_{Er} = C_F \times P_F$

また、地震による年損傷確率 P_F は、損傷度曲線 (Fragility Curve) と地震危険度曲線 (Seismic Hazard Curve) を用いて次のように表される。

$$P_F = \int_0^{\infty} F_R(a) \frac{dF_S(a)}{da} da$$

$F_R(a)$: 損傷度曲線 $F_S(a)$: 地震危険度曲線

4. 動的計画法のフレーム

動的計画法とは、動学最適化問題が時間とともに変化する状態に対応して、行動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して問題を解く方法のことをいう。動学最適化問題では、操作変数 u_t 、外生変数 z_t 、状態変数 X_t の3つの変数を考える。動的計画法を用いたインフラの最適な補修戦略は、任意の期におけるインフラの状態がどの劣化状態なら補修を実施するか否かのルールを決めておき、逐次的に損傷状態を観察しながら、その最適なルールに従って補修を行っていくという補修戦略になる。

5. 設計を考慮したインフラストラクチャ・マネジメントのモデルの構築

設計変数として材料種別 ($d = 1, 2, 3, \dots$) を選択する問題を考える。時点 t での構造物の劣化状態は $i(t) \in \{1, 2, 3, 4\}$ の4段階とする。ある構造物の資産価値について考えたときに、資産価値が最大とされるときは構造物が建設された直後である第0期の損傷状態 $i(t) = 1$ のときに他ならない。そのため、設計変数 d を変化させたときの資産価値の最大化は以下の式で求め

キーワード：設計、更新・補修、インフラストラクチャ・マネジメント、資産価値

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

られる。

$$V(i(0)) = \max_{d \in \{1,2,3\}} V(i(0)) = 1, d)$$

V : 資産価値、 i : 構造物の状態、 d : 設計変数

$$\begin{aligned} V(i(0), d) = & \max_{u \in \{0,1\}} E_i \left\{ \sum_{t=0}^T b(i(t), u(t), d)(1+\rho)^{-t} \right. \\ & - \sum_{t=0}^T C(i(t), d)(1+\rho)^{-t} - \sum_{t=0}^T R(i(t), u(t), d)(1+\rho)^{-t} \\ & \left. - I(d) - \sum_{t=0}^T C_F(d)P_F(i(t))(1+\rho)^{-t} \right\} \end{aligned}$$

$b(i(t), u(t), d)$ は便益を、 $C(i(t), d)$ は運営費を、 $R(i(t), u(t), d)$ は補修更新費、 $I(d)$ は建設費、 $C_F(d)P_F(i(t))$ は地震リスクを表す。

これについてベルマン方程式を立てると

$$\begin{aligned} V(i(t) = i, d) = & \max_{u_i \in \{0,1\}} b(i(t), u_i(t), d) \\ & - C(i(t), d) - R(i(t), u_i(t), d) + C_F(d)P_F(i(t)) \\ & + \gamma \left\{ \sum_j Q_{i,j}(\phi(t), d, u_j(t)) V(i(t+1) = j) \right\} \end{aligned}$$

γ : 割引因子

となりこれらを解くことによって、最適な設計変数が求められる。

6. 数値例 [3]

鋼製の道路橋を例として、数値シミュレーションを行った。その際、疲労による劣化プロセスをマルコフ連鎖で表現した。ある期で状態 $i(t) = i$ のとき、劣化する確率 $M_{i,j}$ は以下のように表される。そして、その確率にしたがって $i(t+1) = j$ と状態へと移行する。

$$\mathbf{M}_{i,j} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & & & \\ & M_{22} & M_{23} & & \\ & & M_{33} & M_{34} & \\ & & & M_{44} & \\ & & & & \end{pmatrix}$$

材料種別は $d=1$ (強強度) $d=2$ (中強度) $d=3$ (弱強度) として、それぞれ最適な補修・更新ルールに従った場合の資産価値を得た。以下にその例を示す。

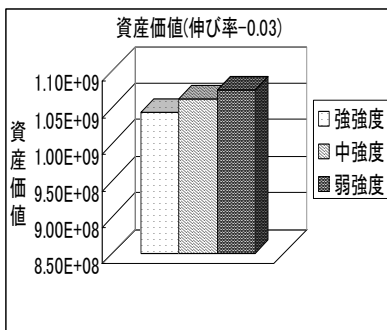


図1 材料強度別資産価値（交通量年間伸び率-0.03）

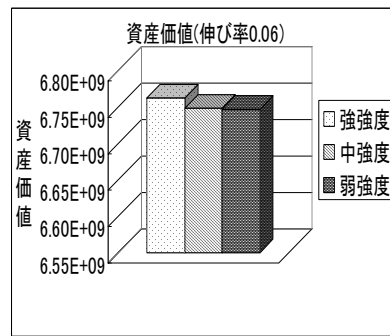


図2 材料強度別資産価値（交通量年間伸び率 0.06）

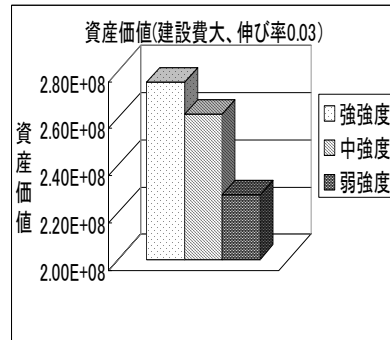


図3 材料強度別資産価値（建設費大、交通量年間伸び率 0.03）

図1では最適設計は材料 $d=3$ (弱強度) となる。また、図2、図3では材料 $d=1$ (強強度) となり、資産価値を最大とする最適設計が異なることが示された。

7. 結論

本研究の結論は、インフラストラクチャ・マネジメントの基本モデルに設計状態を規定する操作変数 d を組み込むことで、動的計画法を用いて導き出される補修・更新のルールが変化することを示し、それによって数値的にはあるが構造物の資産価値が変動することを示した。

参考文献

- [1] 小林潔司、上田孝行：インフラストラクチャ・マネジメント研究の展望と課題、土木学会論文集 No744、2003
- [2] 赤石沢総光、吉田郁政、安田登、宮本幸始：性能設計を活用した RC 構造物の保守頻度・時期の最適化に関する研究、構造工学論文集 vol.47A、pp.277-284、2001
- [3] 木本由花：確率過程に着目したインフラの維持更新、東京工業大学卒業論文、2002