

社会基盤施設ネットワークの最適更新・廃棄施策と需要制御効果

東北大学 学生会員 ○上野 渉
 東北大学 正会員 水谷 大二郎
 東北大学 正会員 奥村 誠

1. はじめに

社会基盤施設（以下、施設）の効率的な維持管理を行うためには、需要の減少に合わせて供用中の施設の廃棄を含めた計画を立てることが必要である。この時、廃棄を考慮に入れて施設の維持管理を行うために、複数施設間の代替性や補完性を考慮した施設ネットワークとして捉えることが望ましい。本研究では各リンクにそれぞれ橋梁が1本ずつ存在する2リンク・2ノードの橋梁ネットワークを対象として、既往研究¹⁾を参考に期待純便益を最大化するように、各橋梁の最適な廃棄タイミングを決定する最適維持・廃棄モデルを構築する。そして、リンク交通量に応じて橋梁の劣化速度が変化する状況を想定し、2リンクの需要（交通量）を最適に制御することで期待純便益がどの程度増加するのか、また、橋梁の廃棄タイミングがどう変化するのかを分析する。

2. 最適維持・廃棄モデルの概要

ノード間には経年的に単調減少する確定的な交通需要が存在する状況を考える。利用者はノード間を移動し効用を得ることができ、その総和を利用者便益と呼ぶ。橋梁群の維持管理施策を検討し始める時点初期時点 $t = 0$ とし、無限時間まで続く離散時間軸 $t = 0, 1, \dots$ を定義する。この離散時間軸上の点を時点と呼ぶ。なお、時点間の時間間隔は一律とする。離散軸上の期間 $[t, t+1)$ を期 t と呼ぶ。橋梁 k ($k = 1, 2$)を含むリンク k の所要時間を τ^k （定数）、各リンクの交通量を $f^k(t)$ とする。また期 t での橋梁 k の劣化状態 $h^k(t)$ は健全度と呼ばれる I 個の離散的な状態変数 i ($i = 1, 2, \dots, I$)で定義する。 i が大きいほど劣化が進行している状態を表し、 $h^k(t) = I$ の状態を使用限界状態と呼ぶ。各橋梁は経年的に劣化し、その劣化速度は $f^k(t)$ に応じて変化する。時点間の橋梁の健全度の推移確率（マルコフ推移確率）は多段階指数ハザードモデル²⁾で求めるものとし、橋梁 k のハザード関数 $\lambda_{i,t}^k$ を式(1)で定義する。 $\theta_{i,t}^k$ はハザード率、 $\beta_{1,i}^k$ と $\beta_{2,i}^k$ は特性変数 $f^k(t)$ の影響と定数項（自然劣化）を表すパラメータである。最終廃棄時点を仮に橋梁が全く劣化しな

いとしても、全ての橋梁が廃棄される時点として定義し、 $t = t^{***}$ とする。 t^{***} は橋梁の供用期間に関する理論的な上界となる。

最適維持・廃棄モデルでは各期 t ($0 \leq t \leq t^{***}$)において次のように各橋梁の最適施策を決定する。橋梁管理者は期 t の期首に点検を行って、各橋梁の健全度情報 $i^k (= h^k(t))$ を獲得する。そして、式(2)～式(4)のように定義した、期 t に橋梁を x 本 ($x = 0, 1, 2$) 供用する場合の期 t での期待純便益 $\Psi_t^0, \Psi_t^1(i^k), \Psi_t^2(i; r^*(t, i))$ を計算し、期待純便益が最も大きくなるように期 t の供用本数を決定し、各橋梁について廃棄施策か、維持施策かのいずれかを選択する。

廃棄施策とは廃棄費用を支払って橋梁を廃棄するもので、期 t 以降当該橋梁は供用されなくなる。維持施策とは維持費用を払って橋梁を維持する施策である。ただし、橋梁が使用限界状態の場合は更新費用を払って、健全度を回復させることが必要となる。つまり、前期に比べて減少した供用本数分の橋梁については廃棄施策を選択し、それ以外の橋梁については、維持施策を選択することとなる。 C は廃棄費用、 $u(t, i^1)$ および $u(t, i)$ は期 t の利用者便益、 c_k^u は橋梁 k の更新費用、 c は橋梁の維持費用、 ρ は割引因子である。 $\hat{\pi}_{i^k, j^k}$ は期 t に橋梁 k を維持する場合における、時点 t に健全度 i^k であるという条件のもとでの時点 $t+1$ に健全度が j^k となる確率である。 $r^*(t, i)$ は2橋梁供用時の期待純便益を最大化するような、期 t の全交通量のうちリンク1へ流す交通量の割合であり、式(5)で定義し最適配分率と呼ぶ。

$V_t^1(i; r^*(t, i))$ および $V_t^2(i^1)$ は、式(6)または式(7)で定義した期 t における期待純便益の最大値を出力する最適値関数である。式(6)および式(7)は右辺に時点 $t+1$ における最適値関数が含まれており、再帰方程式になっている。これらの再帰方程式を $t = t^{***}$ から、時間軸を遡って $t = 0$ まで解いていくことにより、各期の最適施策が求まる。そして、初期時点での最適値関数から、橋梁の供用期間全体での期待純便益の総和を求めることができる。なお、交通量制御を行わない場合の配分率はリンク所要時間によって定まる

キーワード 最適廃棄, 社会基盤施設網, 交通制御, 劣化, アセットマネジメント

連絡先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 東北大学 災害科学国際研究所 S-502 TEL 022-217-6369

一定値をとるものとする。

$$\lambda_{i,t}^k = \theta_{i,t}^k = \beta_{1,i}^1 f^k(t) + \beta_{2,i}^2 \quad (1)$$

$$\Psi_t^0 = -C \quad (2)$$

$$\Psi_t^1(i^1) = u(t, i^1) - (c_u^1 + c) + \rho \sum_{j^1=1}^I \hat{\pi}_{i^1 j^1} V_{t+1}^1(j^1) \quad (3)$$

$$\Psi_t^2(i; r^*(t, i)) = u(t, i) - \sum_{k=1}^2 (c_u^k + c) + \rho \sum_{j^1=1}^I \sum_{j^2=1}^I \hat{\pi}_{i^1 j^1} \hat{\pi}_{i^2 j^2} V_{t+1}^2(j) \quad (4)$$

$$r^*(t, i) = \arg \max \Psi_t^2(i; r(t, i)) \quad (0 \leq r(t, i) \leq 1) \quad (5)$$

$$V_t^1(i; r^*(t, i)) = \max\{\Psi_t^2(i; r^*(t, i)), \Psi_t^1(i^1), \Psi_t^0\} \quad (6)$$

$$V_t^2(i^1) = \max\{\Psi_t^1(i^1), \Psi_t^0\} \quad (7)$$

3. 数値計算事例

2橋梁について、対応するリンクの所要時間と更新費用を等しく、橋梁2のハザード関数のパラメータ $\beta_{1,i}^k$ と $\beta_{2,i}^k$ が橋梁1のそれらの2倍になるように数値を設定する。（ $\tau^1 = \tau^2$, $c_u^1 = c_u^2$, $\beta_{1,i}^1 = 2\beta_{1,i}^k$, $\beta_{2,i}^1 = 2\beta_{2,i}^k$ ）。健全度は5段階で表記し、 $I = 5$ とする。その他の外生パラメータは、実橋梁を想定して設定した。初期時点での健全度組が(1,1)のとき、期待純便益は交通量制御を行うことで、44,892,952 [千円]から45,118,858 [千円]へと約0.5%増加する。また、他の健全度組の場合でも約0.5%~1.0%期待純便益が増加する。また、本モデルでは健全度組別に、期待純便益を最大にするように橋梁を廃棄する時点が求まる。交通量制御を行うことにより、各健全度組での1本目の橋梁が廃棄される時点が、0~15年後になる。これは交通量制御により2本供用した場合の期待純便益が高くなり、1本供用した場合の期待純便益を上回る時点が先送りされるためである。

本研究では2つのリンクの所要時間が等しいため、制御による期待純便益の増分は橋梁群の更新費用の削減によるものである。しかし、最適維持・廃棄モデルで求めた初期時点での期待純便益からは、供用期間の中で橋梁が何回更新され、更新費用がどれくらいかかったのかはわからない。そこで、橋梁群の初期健全度組を(1,1)として、各期の交通量配分に最適配分率を適用して橋梁群の劣化過程をシミュレーションにより発生させた。3,000回のシミュレーションを行い各橋梁の更新回数、更新費用の平均値を表1に示す。これにより制御により期待更新費用がおおよそ6%削減でき、橋梁2の期待更新回数が1回以上減少していることがわかる。

次に、リンク所要時間とハザード関数のパラメータ、初期健全度組の設定は同様とし、橋梁2の更新費用を橋梁1の k 倍と設定した($0 < k \leq 1$)。このとき、 k （橋梁1に対する橋梁2の相対更新費用）の値によって、どちらの橋梁が先に廃棄されるか、また、制御により期待更新費用がどの程度削減されるのかを調べ、図1に示す。その結果、 k が0.3を

表1 交通量制御による更新回数の変化と費用の削減

	橋梁1の 期待更新回数	橋梁2の 期待更新回数	期待更新費用 [千円]
制御なし	5.17	6.57	939,413
制御あり	5.74	5.34	886,400

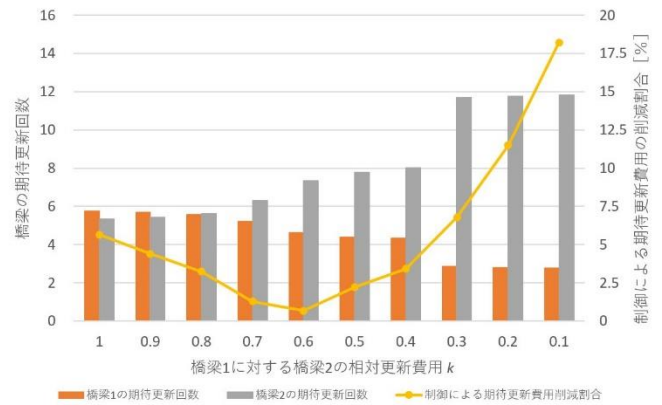


図1 相対更新費用による各橋梁の期待更新回数の変化

下回ると、劣化速度は大きい更新費用が小さい橋梁2を最後まで残した方が、橋梁1を最後まで残すよりも有利となることがわかる。期待更新費用も交通量制御により8%から15%削減されており、交通量制御の効果が大きい。一方で $k = 0.6$ 付近では交通量制御を行っても、期待更新費用の削減割合は小さく、交通量制御の効果はあまり見られない。

4. おわりに

本研究では、2橋梁を対象に最適維持・廃棄施策を求めるモデルを提示し、各リンクへの交通量を最適に制御することにより、廃棄に至るまでの橋梁群の更新費用を削減し、橋梁群の期待純便益を増加させられることを示した。また交通量制御により最適施策が変化することも示した。今後の課題としては、需要が経年的に確定的に減少していくことを踏まえ、補修・更新ルールを複数設けた上で需要制御効果を分析することや、経路選択が考えられる複数ODを対象とできるようにモデルを改良することがあげられる。

参考文献

- 小濱健吾, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 福田泰樹: 劣化過程を考慮した最適廃棄・補修モデル, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.3, pp.141-156, 2012.
- 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/I-73, pp.69-82, 2005