代替性を持つ複数橋梁の最適維持・廃棄施策と交通量制御効果

The optimal maintenance and disposal policy of substitutable bridges and traffic control effect

上野 渉*

Wataru UENO

*地域計画学/被災地支援研究室（指導教員：奥村誠 教授，研究指導教員：水谷大二郎 助教）

社会基盤施設（以下，施設）を効率的に維持管理していくためには，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が立てられる場合もある．本研究では代替性を持つ複数橋梁を対象として，期待純便益を最大にするような最適な維持管理施策を決定する最適維持･廃棄モデルを構築する．そして，橋梁の劣化速度が通過交通量の多寡によって変動する状況を考え，交通量の制御により，劣化速度を制御し，維持管理費用や期待純便益がどれだけ改善するか（交通量制御効果）を分析する．

Key Words:　最適維持・廃棄施策，代替性，交通量制御，劣化，アセットマネジメント

1.　はじめに

施設の効率的な維持管理を行うために，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が立てられる場合がある．廃棄を考慮に入れて施設の維持管理を行うためには，複数施設間の代替性や補完性を考慮することが望ましい．本研究では代替性を持つ 2 橋梁を対象に，既往研究 [1)] を参考に橋梁の持つ期待純便益を最大化するように，各橋梁の最適な維持管理施策を決定するための最適維持･廃棄モデルを構築する．さらに，通過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て，交通量を最適に制御することによる，維持管理費用の減分や，期待純便益の増分を分析する．

2.　最適維持・廃棄モデルの構築

図 1 に示すような 2 つのノード A, B を結ぶ道路上の 2 つの橋梁を考える．AB 間には経年的に単調減少する確定的な交通需要が存在し，利用者はノード間を移動し効用を得ることができる．橋梁群の維持管理施策を検討し始める時点を初期時点$t=0$とし，無限時間まで続く離散時間軸$t=0,1,\ldots$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．リンク$k(k=1,2)$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（$i=1,2,\ldots,I$）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にマルコフ性を仮定し，マルコフ推移確率は多段階指数ハザードモデルで求める．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，橋梁が初期時点から全く劣化せず．劣化に伴う費用が全く発生しないと仮定しても，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．

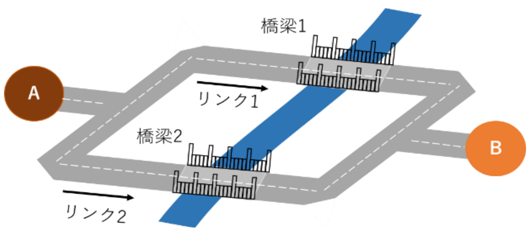

図 1 代替性を持つ 2 橋梁

最適維持・廃棄モデルでは各期t（$0\le t\le t^{***}$）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$h^k(t)=i^k$を獲得する（健全度情報の添え字tは省略する）．次に，式(2)～式(4)で定義した，期tに橋梁をx（$x=0,1,2$)個供用する場合の期tでの期待純便益Ψ_t^0，$\Psi_t^1(i^k)$，$\Psi_t^2(\boldsymbol{i};r^*(t,\boldsymbol{i}))$を計算し(ただし，$\boldsymbol{i}=\left(i^1,i^2\right)$)，期待純便益が最大になるように供用本数を決定し，各橋梁について廃棄施策か維持施策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．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$u(t,\boldsymbol{i})$は期tの利用者便益，c_u^k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．$\hat{\pi}_{i^k j^k}(t)$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．$r^*(t,\boldsymbol{i})$は 2 橋梁供用時の期待純便益を最大にするような，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．

式(6)，式(7)で定義する$V_t^1(\boldsymbol{i};r^*(t,\boldsymbol{i}))$，$V_t^2(i^1)$は，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一定値をとるものとする．

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

$$\Psi_t^0 = -C \tag{2}$$

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

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

$$r^*(t,\boldsymbol{i}) = \arg max\, \Psi_t^2(\boldsymbol{i};r(t,\boldsymbol{i})) \qquad (0 \le r(t,\boldsymbol{i}) \le 1) \tag{5}$$

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

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

3. 数値計算事例

2橋梁のリンク所要時間と更新費用を等しく 20[分], 80,000[千円]とおく．またハザード関数のパラメータを**表 1** のように設定する．($\beta_{1,i}^2 = 2\beta_{1,i}^1$，$\beta_{2,i}^2 = 2\beta_{2,i}^1$)

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も実橋梁を想定して設定した．初期時点での橋梁1と2の健全度$(h^1(0), h^2(0))$が(1,1)のとき，交通量制御の実施により，期待純便益は約0.5%(225,906 [千円]）増加する．他の健全度ペアの場合でも交通量制御により，期待純便益が約0.5%～1.0%増加する．本設定では2つ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・廃棄モデルで求まっ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，橋梁の初期健全度ペアを(1,1)として，各期の施策に最適施策を，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期待更新回数，期待更新費用の平均値を**表 2** に示す．交通量制御により，ハザード関数のパラメータが小さく，劣化しにくい橋梁1により多くの交通を流すことで，期待更新費用がおよそ6%削減できることがわかる．

次に，橋梁2の更新費用を橋梁1のk倍と設定する$\left(c_u^2 = kc_u^1,\ 0 < k \le 1\right)$．このとき，$k$（橋梁1に対する橋梁2の相対更新費用）によって，どちらの橋梁が先に廃棄されるか，また，交通量制御による期待更新費用の減分がどれほどになるかを調べ，**図 2** に示す．その結果，$k=0.6$では期待更新費用は0.6%しか削減されない．この理由を考察する．$k=0.5$では橋梁2は劣化速度が 2 倍，更新費用が0.5倍となり，劣化速度と更新費用の比は橋梁1と等しくなるため，どちらの橋梁に交通量を偏らせ

表 1　指数ハザード関数の数値設定

i	$\beta_{1,i}^1$	$\beta_{2,i}^1$	$\beta_{1,i}^2$	$\beta_{2,i}^2$
1	1.5879×10^{-6}	0.315	3.1758×10^{-6}	0.630
2	1.8525×10^{-6}	0.210	3.7050×10^{-6}	0.420
3	1.7202×10^{-6}	0.1225	3.4404×10^{-6}	0.245
4	9.2626×10^{-7}	0.140	1.85252×10^{-6}	0.280

表 2　交通量制御による更新回数の変化と更新費用の削減

	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

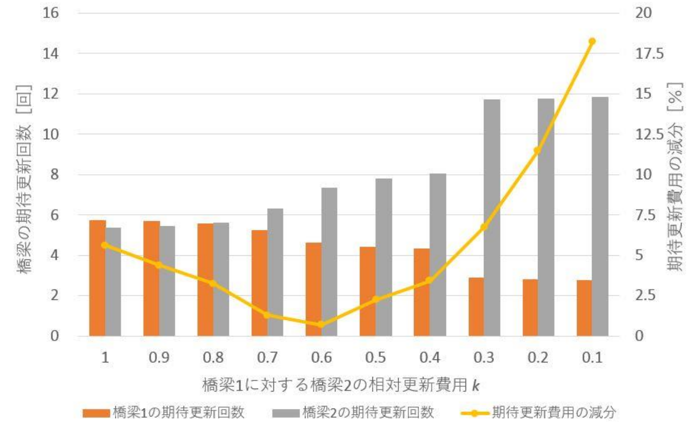

図 2 相対更新費用と交通量制御効果の関係

ても更新費用に差がつかない．そのため，$k=0.5$付近では交通量制御による更新費用の減分は小さくなると考えられる．また，kが小さくなるにつれて 2 橋梁供用期間は長くなっている．そのため，交通量制御による更新費用の減分も大きくなると考えられる．これらの 2 つの理由から$k=0.6$で交通量制御効果が最も小さくなったと考えられる．一方，$k \le 0.3$では，劣化速度は大きいが更新費用が小さい橋梁2を最後まで残す方が有利となり，交通量制御により期待更新費用も7%から18%と大きく削減される．以上より，2 橋梁間で劣化速度と更新費用の比が大きく異なっている程，交通量制御効果は強く発揮されると考えられる．

4. おわりに

本研究では，代替性を持つ2橋梁を対象に最適維持・廃棄施策を求めるモデルを構築し，交通量を最適に制御することにより，更新費用の削減や，期待純便益の増大が図れることを示した．今後の課題として，供用期間の途中での補修・更新ルールの切り替えを可能とするように最適維持・廃棄モデルを改良して最適施策の決定や，交通量制御効果を分析することがあげられる．

参考文献

1) 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.

(2019 年 2 月 5 日提出)