

社会基盤施設ネットワークの 最適更新・廃棄方策における需要制御効果

上野 渉¹・水谷 大二郎²・奥村 誠³

¹非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: wataru.ueno.r4@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助教 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: mizutani@irides.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail: okumura@irides.tohoku.ac.jp

社会基盤施設ネットワークにおいて、ノード間の移動の需要減少とネットワークを構成する施設の劣化の進展に伴い、ネットワークを構成する個々の施設の廃棄が検討される可能性がある。本研究では、2ノード2リンクのシンプルな社会基盤施設ネットワークにおいて、2個のリンクの最適更新・廃棄モデルを双方のリンクの劣化過程を考慮して定式化し、リンク間の代替可能性を考慮することにより、個々のリンクで独立に最適更新・廃棄方策を決定した場合と異なる最適更新・廃棄方策が導出される可能性を分析する。さらに、個々のリンクを通過する交通量に応じて劣化過程が変化する状況を想定し、2リンク間で需要(交通量)制御を実施することによる社会的総余剰がどの程度増加するのかを分析する。

Key Words : *optimal scrapping, infrastructure network, traffic control, deterioration, asset management*

1. はじめに

我が国は人口減少期に入り、特に、過疎地域などにおいて、維持管理費用の捻出が困難となるような社会基盤施設(以下、施設)が今後発生する可能性がある。さらに、高度経済成長期に建設された施設の多くは供用開始から50年が経過し老朽化が進展しており、維持管理費用の増加が見込まれている。このような状況の中では、施設の劣化過程を考慮しながら、少ない費用で施設を適切に維持管理し、社会的総余剰を最大にするような最適維持管理方策についての検討を行うと同時に、需要の減少に見合うように施設の必要性を議論するような最適廃棄方策についても検討を行うことが望ましい。道路などの施設は、一般的に、施設ネットワークを形成する。このように、施設ネットワークを形成する施設群については、ある施設の維持管理方策や廃棄方策がネットワーク内の別の施設の劣化過程に影響を及ぼす。そのため、このような施設群についてはネットワーク内のリンクの代替可能性などを考慮して維持管理方策や廃棄方策を同時決定してゆく必要がある。

施設の劣化に関しては、i) 使用状況に依存せず時間的に一定の劣化速度を持つ経年による劣化、ii) 使用状

況に依存して変動する劣化速度を持つ使用による劣化、の2種類に大別できる。橋梁を例にとると、前者は降雨や積雪、塩害環境などに起因して進展するような劣化、後者は交通量の多寡に応じて進展するような劣化が考えられる。その際、後者に関して、施設ネットワークにおける所要時間や利用料金などを所与とした際には、交通量が利用者均衡配分によって決まる。しかしながら、交通量の多寡に応じて進展するような劣化に対しては、外生的なルールを用いて交通量を制御することにより、劣化過程が制御でき、制御しない場合と比べ施設群が持つ社会的総余剰の現在価値の総和が大きくなる可能性がある。

以上の問題意識のもと、本研究では、個々のリンクにつき1つの橋梁が存在する2ノード2リンクのシンプルな施設ネットワークにおいて、2個の橋梁の最適更新・廃棄モデルをリンク間の代替可能性を考慮して、双方の橋梁の劣化過程を定式化し、個々のリンクで独立に最適更新・廃棄方策を決定した場合と異なる最適更新・廃棄方策が導出される可能性を分析する。具体的には、個々の橋梁の劣化過程を多段階指数ハザードモデル(マルコフ劣化ハザードモデル)により表現し、2つの橋梁の更

新・廃棄施策の同時最適化問題を解く。その際、マルコフ劣化ハザードモデルのハザード率が交通量に応じて変動するとして、2リンク間で交通量制御施策を実施することで社会的総余剰がどの程度増加するかを分析する。

以下、2.で本研究の基本的な考え方を述べる。3.で施設ネットワークの最適更新・廃棄モデルを定式化し、4.でその解法を説明する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往研究の概要

施設の劣化過程を確率過程で表現し、ライフサイクル費用を最小化、あるいは、期待純便益、社会的総余剰の現在価値を最大化するような、最適維持管理施策を求めるモデルは数多く存在する。劣化予測モデルに関しては、劣化過程を表現する確率過程を、実在する施設の点検データを用いて統計的に推定する統計的劣化予測モデルにより、劣化過程の不確実性や異質性を考慮したモデル化が可能となっている。特に、施設の状態を離散的な状態変数を使って表現するマルコフ過程モデルは、劣化過程を簡便に表現することができ、多くの研究で用いられている。中でも、マルコフ劣化ハザードモデル¹⁾の開発により、非集計的なマルコフ推移確率の推定が可能となり推定精度が向上するとともに、ハザード関数に交通量や構造条件、環境条件などの特性変数の影響を表す項を内包しそれに対応するパラメータも推定することにより特性変数が劣化過程に与える影響も計量化可能となった。その中で、交通量などの一部の特性変数は維持管理施策として外的に制御できる可能性がある。瀬木等³⁾は、道路利用に起因した施設の劣化による外部不経済性を内部化した次善高速道路料金に関する分析を行うとともに、高速道路の料金設定による大型車の経路誘導が維持補修費用の軽減効果の有効性を高めることを示している。瀬木等はこれらの分析を静学的な枠組みで実施しており、その方法論を施設の廃棄のような動学的な枠組みに適用するのは困難である。本研究では、交通量の制御を行い維持補修費用の最小化や社会的総余剰の最大化を図るための方法論を提案する。

既往研究の多くは、施設が永久的に使われることを前提として統計的劣化予測結果を用いて最適維持管理施策を求めているものが多い。一方で、施設の廃棄を検討に入れた研究も存在している。織田澤等⁴⁾は、ともに不確実性を含む施設の物理的な劣化と経済的な劣化を考え、施設の運営終了を考慮に入れてプロジェクトの期待純便益の現在価値を最大化するような最適修繕施策・運営施

策を決定するモデルを提案している。また、小濱等⁵⁾は、将来確定的な需要の減少が見込まれる施設について、施設の期待純便益の現在価値が最大となるように、施設の維持管理施策を補修施策、廃棄保留施策、廃棄施策と切り替えるタイミングを決定するようなモデルを提案している。これらの研究では単一の施設について、その施設の期待純便益の現在価値を最大化するような最適廃棄・補修施策を決定することを目的としている。施設ネットワークの個々の施設に対する維持管理施策を、リンクの連結性や代替可能性を考慮して求めるための方法論は既に既往研究^{6),7)}で提案されているが、これらの方法論は需要減少状況下において施設の廃棄を考慮するためには直接的に用いることができず、施設ネットワークの連結性や代替可能性を考慮して施設の最適更新・廃棄施策を決定できる点に本研究の新規性と有用性がある。

(2) 廃棄施策と需要制御施策

通常、施設に対しては、複数の補修施策や更新施策（予防保全や事後保全など）の候補を検討し、その中から最適な施策を選定することが望ましい。補修施策や更新施策を議論するにあたり、ライフサイクル費用を最小化するような施策を最適施策として選定することも考え得る。しかしながら、ライフサイクル費用を最小化するようなアプローチは、現在の施設ネットワーク構造の妥当性を前提として、現在の施設ネットワークをどう維持するかという前提に立っている。施設の廃棄問題を取り扱う場合には、施設ネットワークの構造の変動の妥当性（本研究では、需要が時間的に減少しているため、施設ネットワークの縮小過程の妥当性）を議論する必要がある。そのためには、ライフサイクル費用ではなく、社会的総余剰を最大化するようなアプローチにより議論を行う必要がある。このような考え方に基づき、例えば、小濱等⁵⁾は、定常的な補修施策を廃棄施策と同時に最適化している。本研究では、予防保全を行うためには人的資源が不足しているような過疎地域の施設ネットワークを想定し、施設の管理施策について更新施策（最も劣化の進展した健全度の施設を新設状態と同様の劣化状態に回復させる施策）と廃棄施策のみを考え、補修施策の最適化に関しては今後の検討課題とする。

需要が減少していく中、ある施設を更新するよりも廃棄した方が施設ネットワークの社会的総余剰の総和が大きくなると判断されると、その施設は廃棄される。その際、廃棄対象の施設が直近の期に使用限界に達し、更新され、その後すぐに廃棄される可能性がある。そこでリンクの代替可能性を考慮して、各リンクを通過する交通量を制御する外生的なルールを導入し、需要（本研究では具体

的には交通量を想定) 制御施策を行うことを考える。これにより、不確実性は介在するものの、施設の劣化速度を制御することができる可能性がある。施設群の社会的総余剰の総和を考慮しながら需要制御施策を行うことにより、ある施設が使用限界に達する直前に廃棄されるように制御でき、効率よく更新を行うことが可能になり社会的総余剰がより増加する可能性がある。そのため本研究では、施設の更新・廃棄施策と需要制御施策を同時に考える。

3. 更新・廃棄モデル

(1) 対象とするネットワーク

図-1に示すような2ノード2リンクのネットワークを形成する2つの橋梁を対象にする。各リンクにそれぞれ1つの橋梁が存在する。また、2つの橋梁の構造や全長は同一である状態を考える。また、橋梁の劣化に影響を与える要因としては交通量のみを特性変数として考慮する。利用者が、需要に応じてノードA、ノードBの間を移動する状態を考える。なお、ここでは移動の向きを識別せず方法論を提案する。橋梁 k を含む経路 k の所要時間を τ^k とする($k = 1, 2$)。なお、橋梁1、橋梁2が存在するそれぞれのリンクでは、これらの橋梁が主要な施設であり、その他の土工部の舗装や道路付帯施設の劣化、補修、更新については本研究では議論しないこととする。

(2) 前提条件

無限時間まで続く離散時間軸 $t = 0, 1, \dots$ を定義する。この離散的時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。時点間の時間間隔は一律に s とする。対象橋梁群の維持管理施策を一斉に検討し始める時刻 t_0 を初期時点 $t = 0$ とする。 t_0 は橋梁群の供用開始時刻と一致している必要はない。離散軸上の期間 $[t, t + 1)$ を t 期と呼ぶ。橋梁の劣化状態は I 個の健全度 i ($i = 1, 2, \dots, I$) で表す。健全度が大きくなるほど橋梁の劣化が進行していることを示す。 $i = I$ のとき橋梁は使用限界に達しているといい、更新を行わなければ橋梁の使用を続けることはできない。また橋梁 k ($k = 1, 2$) の t 期での健全度を $h^k(t)$ と表す。 t 期の期首において各橋梁に対して点検が行われ、健全度に関する情報が獲得される。点検結果に基づいて各橋梁について更新施策か廃棄施策を採用する。廃棄施策が選択された場合、橋梁は直ちに廃棄され、 t 期以降における該当橋梁に関する施策の意思決定はなくなる。一方で t 期において橋梁 k を利用することにより得られる便益を次の式(1)で定義する。

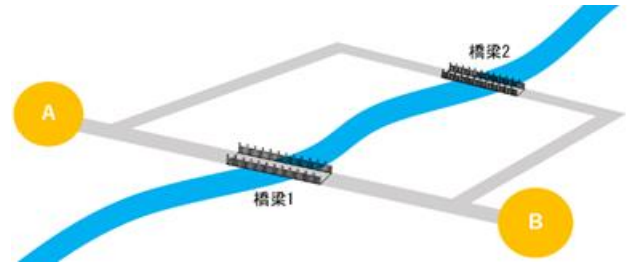


図-1 対象とする2本の橋梁

$$v^k(t) = V - \alpha \tau^k \quad (1)$$

図-1においてトリップすることで得られる車一台あたりの効用を V とし、外生的に定数で与える。 α は時間価値を表す定数で外生的に与える。対象橋梁群は過疎地域に位置しているため混雑は発生せず τ^k は定数で与えられる。ただし

$$\tau^2 > \tau^1 \quad (2)$$

とする。また、時点 t に A から B へ向かう分布交通量と B から A へ向かう分布交通量の和を $F(t)$ とする。 $F(t)$ は以下の式で与えられるものとする。

$$F(t) = F(0) \cdot \exp(-\beta t) \quad (3)$$

$F(0)$ は初期時点での交通量、 β はパラメータでどちらも外生的に与える。また、時点 t での経路 k の交通量を $f^k(t)$ とおく。交通量保存則より

$$F(t) = f^1(t) + f^2(t) \quad (4)$$

$f^k(t)$ は利用者均衡配分によって決まるか、外生的な制御ルールで決まるかによって求め方が異なる。利用者均衡は確率的なものと考え、また、制御ルールは定常的なもの考える。前者によって決まる場合、ロジット・モデルを使って以下のように求められる。

$$f^k(t) = F(t) \cdot \frac{\exp(-\gamma \tau^k)}{\sum_k \exp(-\gamma \tau^k)} \quad (5)$$

γ は外生的に与える。リンク交通量を外生的に制御する場合は制御ルール $r \in R$ によって決まる。

(3) マルコフ推移確率

橋梁 k の劣化過程は交通量に応じてマルコフ推移確率が変化するマルコフ過程に従うと仮定する。2つの時点 $t, t + 1$ 間での健全度の推移(劣化過程)をマルコフ推移確率で表現する。マルコフ推移確率 $\pi_{ij}^k(s)$ の定義を次の式で示す。

$$\text{Prob}(h^k(t + 1) = j | h^k(t) = i) = \pi_{ij}^k(s) \quad (6)$$

全ての (i, j) の組み合わせについてマルコフ推移確率 $\pi_{ij}^k(s)$ を求めるとマルコフ推移行列 $\Pi^k(s)$ が定義できる

$$\Pi^k(s) = \begin{pmatrix} \pi_{11}^k(s) & \cdots & \pi_{1I}^k(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II}^k(s) \end{pmatrix} \quad (7)$$

マルコフ推移確率に関して、更新をしなければ健全度が

回復しないこと、健全度は1個のいずれかの値をとることより以下が成り立つ。

$$\pi_{ij}^k(s) \geq 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, I) \quad (8)$$

$$\pi_{ij}^k(s) = 0 \quad (i > j) \quad (9)$$

$$\sum_{j=i}^I \pi_{ij}^k(s) = 1 \quad (10)$$

指数ハザードモデルを用いたマルコフ推移確率の推定に関する研究¹⁾から、橋梁の構造特性や使用環境を表す特性ベクトルを用いてハザード率を表し、ハザード率で表される指数ハザード関数を用い離散軸上の任意間隔でのマルコフ推移確率 $\pi_{ij}^k(s)$ を求めることができる。また、交通量制御施策の有無による社会的総余剰の増加可能性について考察するのが主目的のため、橋梁の特性、使用環境を表す特性変数は交通量のみを用いる。橋梁の健全度が i から $i+1$ に推移する過程を表す指数ハザード関数 $\lambda_{i,t}^k$ を、ハザード率 $\theta_{i,t}^k$ 、特性変数ベクトル $\mathbf{x}^k = (x_1^k, x_2^k)$ 、パラメータベクトル $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2)$ を用いて以下の式で表す。

$$\lambda_{i,t}^k = \theta_{i,t}^k = \mathbf{x}^k \boldsymbol{\beta}' = \beta_1 x_1^k + \beta_2 \quad (11)$$

添え字1と2はそれぞれ交通量と定数項を表す。特性変数に関して $x_2^k = 1$ とする。記号「 $'$ 」は転置操作を表す。任意間隔 s での施設 k の健全度のマルコフ推移確率 $\pi_{ij}^k(s)$ は以下のように表わされる。

$$\pi_{ii}^k(s) = \exp(-\lambda_{i,t}^k s) \quad (12a)$$

$$\pi_{ii+1}^k(s) = \frac{\lambda_{i,t}^k}{\lambda_{i,t}^k - \lambda_{i+1,t}^k} \{-\exp(-\lambda_{i,t}^k s) + \exp(-\lambda_{i+1,t}^k s)\} \quad (12b)$$

$$\pi_{ij}^k(s) = \sum_{q=i}^j \prod_{m=i}^{q-1} \frac{\lambda_{m,t}^k}{\lambda_{m,t}^k - \lambda_{q,t}^k} \prod_{m=q}^{j-1} \frac{\lambda_{m,t}^k}{\lambda_{m+1,t}^k - \lambda_{q,t}^k} \exp(-\lambda_{q,t}^k s) \quad (12c)$$

$(j = i + 2, i + 3, \dots, I - 1)$

$$\pi_{iI}^k(s) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{ij}^k(s) \quad (12d)$$

(4) 更新施策と廃棄施策

t 期の期首に各施設の健全度が観測されると、施設管理者は施設を廃棄するか、更新して使い続けるかを選択する。 t 期の期首で廃棄施策を採用すると、廃棄費用 C を払って施設は廃棄される。 t 期以降に当該施設から便益は発生しない。ゆえに、 t 期で発生する純便益は $-C$ である。時点 t で更新施策を採用すると定常的な更新ルールに従って施設は更新される。更新ルールは健全度が $i = I$ に達したら健全度を $i = 1$ に回復させ、 $i \neq I$ なら更新を行わないという事後更新ルールを採用する。 t 期にかかる更新費用を c_t とする。更新を行わなければ $c_t = 0$ である。また、更新施策を採用している期間は、更新の有無にかかわらず毎期 c の維持管理費用がかかる。更新

による健全度の i から l への推移を以下のように定式化する。

$$q(i, l) = \begin{cases} 1 & (l = i \text{ or } (i, l) = (I, 1)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

橋梁 k について t 期の期首に $h^k(t) = i$ の状態から、更新施策を行い、その後施設が劣化して $t+1$ 期の期首に $h^k(t+1) = j$ の状態に至る、更新・劣化過程の推移確率 $\hat{\pi}_{ij}^k(s)$ は

$$\hat{\pi}_{ij}^k(s) = \sum_{l=1}^I q(i, l) \pi_{lj}^k(s) \quad (14)$$

と表せられる。

橋梁 k が t 期の期首に $h^k(t) = i$ の状態、更新施策が行われ $t+1$ 期の期首に $h^k(t+1) = j$ に推移して、それ以降の期に最適な施設管理施策を採用した場合に獲得できる期待純便益の割引当該期価値は以下の式で表せる。

$$\Psi_t^{k,m}(i:r) = f^k(t)v^k(t) - c_t - c + \rho \sum_{j=1}^I \hat{\pi}_{ij}^k(t)V_{t+1}^k(j:r) \quad (15)$$

ここで添え字 m は更新施策を表している。 $V_{t+1}^k(j:r)$ は $t+1$ 期の期首において健全度が $h^k(t+1) = j$ であるときに制御ルール r のもとで $t+1$ 期以降に最適な管理施策を適用した場合に獲得できる期待純便益の割引当該期価値の最大値である。交通量が内生的に決まる場合 r を考慮する必要はない。

(5) モデルの定式化

モデルを定式化するにあたり以下の仮定を行う。

- ・両方の橋梁が同じ期に廃棄されることはない
- ・橋梁が廃棄される場合、より所要時間がかかる橋梁2の方が先に廃棄される($\tau_2 > \tau_1$)

施設管理者は t 期の期首において、 t 期以降に獲得する施設の期待純便益の割引当該期価値の和が最大になるようにそれぞれの橋梁について廃棄施策または更新施策のどちらかを選択する。橋梁 k について廃棄施策が選択された場合、それ以降の期について該当橋梁についての施策の意思決定の可能性は消滅する。需要(交通量)が減少し続けること、また、更新施策を行っている間は定期的に維持管理費用がかかることから、将来のある時点で2つの橋梁は両方とも廃棄された状態となる。以下では交通量が制御ルールに従って制御される場合を考え、モデルを定式化する。橋梁が2つとも供用されているとき、 t 期における意思決定モデルは以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} V_t(i:r) &= V_t^1(j:r) + V_t^2(i:r) \\ &= \max\{\Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,m}(i:r), \\ &\quad \Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,n}(i:r)\} \end{aligned} \quad (16)$$

ある時点 $t = t^*$ で橋梁2が廃棄される。(16)式の添え字 n は既に施設が廃棄されていることを表しており、

$$\Psi_t^{2,n}(i:r) = 0 \quad (17)$$

である。 $t = t^*$ では廃棄費用が発生する。これを考慮して $t = t^*$ での期待純便益の割引当該期価値の最大値は $V_{t^*}(i:r) - C$ とする。橋梁 2 が廃棄された後の t 期における意思決定モデルは以下のように定式化できる。

$$V_t(i:r) = V_t^1(i:r) = \max\{\Psi_t^{1,m}(i:r), -C\} \quad (18)$$

ある時点 $t = t^*$ で橋梁 1 も廃棄される。(17)式と(18)式をまとめて、 t 期における意思決定モデルは

$$V_t(i:r) = \max\{\Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,m}(i:r), \Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,n}(i:r), -C\} \quad (19a)$$

ここで式(19a)の右辺に $V_{t+1}^k(j:r)$ ($k = 1, 2$) が含まれていることから、問題(19a)は $V_t^k(i:r)$, $V_{t+1}^k(j:r)$ に関する再帰方程式になっている。初期時点 $t = 0$ において観測された健全度を $(h^1(0), h^2(0)) = (i_0^1, i_0^2)$ とおく。初期時点において橋梁 1 と橋梁 2 で健全度が等しいとは限らない。初期時点における再帰方程式は以下のように表わせる、

$$V_0(i_0:r) = \max\{\Psi_0^{1,m}(i_0^1:r) + \Psi_0^{2,m}(i_0^2:r), \Psi_0^{1,m}(i_0^1:r) + \Psi_0^{2,n}(i_0^2:r), -C\} \quad (20a)$$

$$\Psi_0^{k,m}(i_0^k:r) = f^k(0)v^k(0) - c_t - c + \rho \sum_{j=i}^I \hat{\pi}_{ij}^k(0)V_1^k(j:r) \quad (21a)$$

$V_0(i_0:r)$ は初期時点で評価した 2 つの橋梁の期待純便益の割引現在価値の最大値を表しており、最適更新・廃棄モデルを使って最適維持管理施策を求める問題は施設群の資産価値を最大化する問題に帰着する。

交通量を制御しない場合についても同様に定式化ができる。

$$V_t(i) = \max\{\Psi_t^{1,m}(i) + \Psi_t^{2,m}(i), \Psi_t^{1,m}(i) + \Psi_t^{2,n}(i), -C\} \quad (19b)$$

$$V_0(i_0) = \max\{\Psi_0^{1,m}(i_0^1) + \Psi_0^{2,m}(i_0^2), \Psi_0^{1,m}(i_0^1) + \Psi_0^{2,n}(i_0^2), -C\} \quad (20b)$$

$$\Psi_0^{k,m}(i_0^k:r) = f^k(0)v^k(0) - c_t - c + \rho \sum_{j=i}^I \hat{\pi}_{ij}^k(0)V_1^k(j) \quad (21b)$$

4. モデルの解法

最適更新・廃棄モデル(19a)を解くためには $\Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,m}(i:r)$ と $\Psi_t^{1,m}(i:r) + \Psi_t^{2,n}(i:r)$ を各 t 期について求める必要がある。今、以下の式を満たす最終廃棄時点 t^{***} を考える。

$$\Psi_t^{1,m}(1:r) = f^1(t)v^1(t) - c + \rho V_{t+1}^1(1:r) \quad (22)$$

$$\Psi_{t^{***}-1}^{1,m}(1:r) > -C \quad (23)$$

$$\Psi_{t^{***}}^{1,m}(1:r) \leq -C \quad (24)$$

t^{***} は橋梁 1 のみが供用されていて、橋梁 1 の劣化が生じず、健全度が 1 のまま推移しても施設廃棄が選択される時点であり、施設利用期間に関する理論的な上界を示し

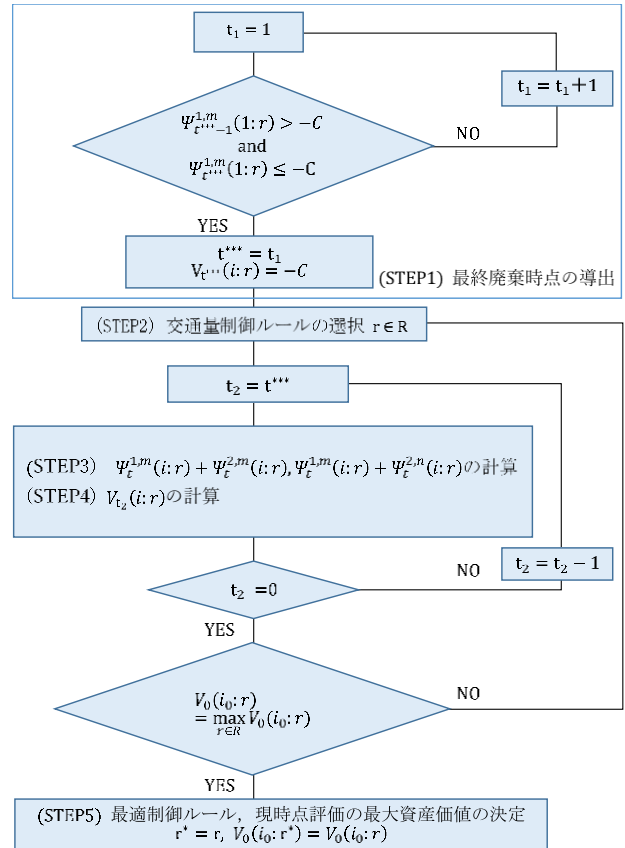


図-2 モデルのアルゴリズム

ている。3.(5)で仮定したように橋梁は順次廃止されていくため、最後は橋梁1の最適更新・廃棄に関する問題となる。さらに実際は施設の劣化が進むので施設廃棄が選択される時点 t^{***} は時点 t^{**} よりも小さい。よって t^{***} では必ず施設廃棄が選択される。そこで最終廃棄時点 t^{***} から逆向きに縮約された最適更新・廃棄モデルを解いていき、各期での最適管理施策を求めることができる。そして初期時点まで遡ることで $V_0(i_0:r)$ が求まる。図-2 にモデルのアルゴリズムを示す。また解法の手順を以下のように整理する。

(STEP1) 最終廃棄時点 t^{***} を求める。

(STEP2) 交通量制御ルール $r \in R$ を与える

(STEP3) 各橋梁ごとに、任意の i, t に対して、 t 期で健全度 i である橋梁の更新政策・廃棄政策に応じた割引当該期価値を求め、また、その組み合わせを求める。

(STEP4) $V_{t_2}(i:r)$ を求める。

(STEP5) 全ての交通量制御ルールに関して $V_0(i:r)$ を求め、最適ルール r^* を決定する。

交通量を制御しない場合の最適更新・廃棄モデル(19b)の解法も、概ね交通量を制御する場合と同様にして解ける。この場合は上記解法手順で(STEP2)を考慮する必要がなくなる。

5. おわりに

本研究では、個々のリンクに1つの橋梁が存在する、2ノード2リンクの施設ネットワークにおいて、2個の施設の最適更新・廃棄モデルを双方の施設の劣化過程を考慮して定式化した。本研究で提案する方法論を用いることにより、施設の代替可能性を考慮し、交通量を外生的なルールで制御しながら最適更新・廃棄施策を決めることで、個々のリンクで独立に最適更新・廃棄施策を決定した場合に比べ、社会的総余剰の和がどの程度大きくなるかを分析することができる。

今後の研究課題としては本研究のモデルを実際の事例に適用し、交通量制御ルールを導入した場合としない場合の現時点評価の最大資産価値を比較して、交通量制御の効果を定量的に示すことがあげられる。また所与として与えた需要関数や利用者の時間価値といった外生的に与えたパラメータを変化させ、それに応じて交通量制御の効果がどう変化するか分析することも課題としてあげられる。

なお、研究発表会当日には、実施施設ネットワークの廃棄問題を想定した問題に、本研究で提案する方法論を適用した事例も併せて示す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集 No.801/I-73, pp.83-96, 2005
- 3) 瀬木俊輔, 小林潔司, 田上貴士: 維持補修費用を考慮した次善高速道路料金, 土木学会論文集 D3, Vol.70, No.3, pp.145-160, 2014.
- 4) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 5) 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.
- 6) Burkhalter, M., Martani, C., and Adey, B. T.: Determination of risk-reducing intervention programs for railway lines and the significance of simplifications, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.24, Issue 1, 04017038, 2017.
- 7) Mizutani, D., Burkhalter, M., Adey, B. T., Martani, C. and Ramdas, V.: Initial investigations into the use of three heuristic algorithms to determine optimal intervention programs for multiple railway objects, *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, Vol.6, No.3, pp.1-20, 2017.

(?)

AN OPTIMAL MAINTENANCE AND SCRAPPING MODEL OF INFRASTRUCTURE NETWORKS WITH TRAFFIC CONTROL POLICY

Wataru UENO, Daijiro MIZUTANI and Makoto OKUMURA

In this study, a methodology is proposed to optimize scrapping one of facilities which makes up infrastructure network along with the decrease of demand between nodes and the progress of the deterioration. Specifically, the authors treat a simple infrastructure network which is composed of two nodes and two links, and formulate an optimal maintenance and scrapping model for each link considering its deterioration process. The possibility, that the optimal maintenance and scrapping policy varies by considering the possibility of substitutability between two links, is investigated with the proposed methodology. This study also investigates effectiveness of traffic control policies to increase total social surplus in the situation where the deterioration process of each link depends on the traffic density passing each link.