

# 大規模更新スケジュール最適化のためのネットワークデザイン問題

A Network Design Problem for Optimization of Long-term Replacement Plan

北海道大学工学部環境社会工学科  
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 三輪三太 (Santa Miwa)  
正員 杉浦聡志 (Satoshi Sugiura)

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に整備された社会資本の一つである道路の多くが供与開始から 50 年をむかえようとしている。その割合は 2033 年度に道路橋で約 63%、トンネルで約 42%に達すると見込まれる<sup>1)</sup>。特に、高速道路については供与開始から 30 年以上経過した延長が約 3,700km と全体の 4 割を占めている<sup>2)</sup>。これらのことから、交通機能として生活や経済活動を支える道路の更新工事が、今後増大することが予想されている。更新工事では橋梁の部材交換等を含むことも多く、対象道路の車線規制や通行止めにより交通容量の低減を伴う。更新工事においては、対象道路のみならず混雑や迂回が生じるため、道路ネットワーク(以下、ネットワーク)全体の利用者に及ぶ影響を考慮する必要がある。これらの更新工事に伴う規制に伴う利用者の移動時間の増分を考慮し、社会・経済活動に与える影響を最小限に留める計画を策定する必要がある。以上のような社会的背景を踏まえて、本研究では対象とする更新工事を松坂ら<sup>3)</sup>の大規模更新の定義によって与える。その上で、大規模更新に伴う利用者への影響を最小化する大規模更新スケジュールをネットワークデザイン問題(以下、NDP)として求解する手法を提案する。

本研究では、ネットワーク上の複数リンクで大規模更新工事が予定されている状況を考える。このときに利用者の経路選択を考慮して、交通容量の減少による総走行時間の増分を最小化するような大規模更新スケジュールを見つけることを目的とする。つまり、一般的な NDP とは異なり、工事プロジェクト期間中における総走行時間増分の最小化を対象とする。ここでは、同時期に複数のリンクが施工、規制する施工計画も考慮される。したがって、提案モデルは離散的な時系列を陽に考慮した NDP であるといえる。

## 2. 大規模更新スケジュール最適化 NDP の概要

類似の研究としては Ma et al.<sup>3)</sup>らがある。経路選択に利用者均衡(UE)を仮定して、すべての工事対象リンクを2つずつ施工する前提において、総走行時間を最小とする大規模更新計画を与える手法を提案している。この研究では2つずつのリンクの組み合わせのみが考慮可能であること、車線規制と通行止めなど、複数の規制方法を混在する場合には適用できない課題が残されている。本研究ではこれらの課題を踏まえて、図-1 に示すように下位問題に確率的利用者均衡配分(以下 SUE という)、上位問題に大規模更新プロジェクト期間中の総走行時間の増分を最小化するリンクの組み合わせの探索をもつ Bi-Level 問題

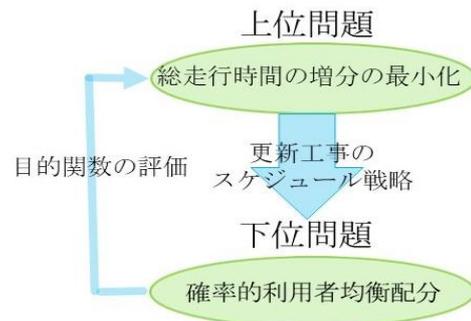


図-1 本モデルのフローチャート

として定式化する。以上から総走行時間の増分を最小化する大規模更新スケジュールを出力する。例として、あるネットワークで 3 つのリンク (A, B, C) において大規模更新を計画する場合を考える。ここで、大規模更新スケジュールの構成のため、以下の仮定をおく。

- ・ 大規模更新スケジュールは離散的な順序をもつ期間で設定する。
- ・ 大規模更新が必要なリンクはいずれかの期間内で施工、規制されるものとする。
- ・ 大規模更新時の規制は各リンクにおいて交通量が通常時の半分となる車線規制と交通容量 0 となる通行止めによる戦略をもつ。
- ・ 規制は車線規制か、通行止めのいずれかを更新期間に渡って継続し、1 つのみ選ばれることとする。
- ・ 同時に複数リンクで大規模更新が実施される場合、通行止めによる規制区間は車線規制による規制区間よりも短期に終了することとする。

車線規制による大規模更新と通行止めによる大規模更新を同期間に行う場合、通行止めによるリンクの大規模更新が終了後、車線規制による大規模更新の規制期間が存在する。したがって、同期間内に 2 つの異なる規制状態を考慮する必要がある。これに対応するため、1 つの期間を 2 つの時限に区分することとする。1 つ目の時限は通行止めによる大規模更新が実施される。この期間は車線規制で更新工事を実施するリンクも存在している。2 つ目の時限は車線規制によるリンクのみが規制される。行を更新期間と時限、列を大規模更新が必要なリンクとする。各要素について、0 を大規模更新不実施、1 を大規模更新実施と表す。以上を踏まえて、表-1、表-2 のような規制方法ごとによる表を作成する。表-1 に示すように、ここでは更新期間を 3 つとしたケースを考える。それぞれの期間に 2 つの時限を設ける。時限について以下に解説する。車線規制における大規模更新では、大規模更新が必要なリンクはいずれの更新期間でも大規模更新の実施が可能である。しかし、制約として同一更新期間の時限

での実施しなければならない。例では更新期間 1 でリンク A が、更新期間 2 はいずれのリンクも実施せず、更新期間 3 でリンク B が大規模更新を実施する。

車線規制における大規模更新では、同様に更新期間が 3 つのケースで与えられ、それぞれの期間に 2 つの時限を設ける。通行止めにおける大規模更新では、大規模更新が必要なリンクはいずれの更新期間においても時限 1 でのみ大規模更新の実施が可能とする。例では、更新期間 1 と更新期間 2 ではいずれのリンクも実施せず、更新期間 3 でリンク C が通行止めで大規模更新を実施する。よって、更新期間 1 では更新期間 3 の時限 1 でリンク B が車線規制で、リンク C が通行止めで大規模更新を実施する。そして、時限 2 ではリンク B のみが片側車線で大規模更新を続ける。以上より、更新期間 1 ではリンク A が車線規制で、更新期間 3 では、リンク B が車線規制で、リンク C が通行止めで大規模更新を実施し、更新期間 2 はいずれのリンクも不実施と読み取る。以上のような表を大規模更新スケジュールとして出力するモデルを以下で定式化する。

### 3. 大規模更新スケジュール NDP の定式化

#### 3.1 記号の定義

本研究の定式化にあたって用いる記号について以下のように定義する。

- $a$  : リンクの識別子  $a = \{1, 2, 3 \dots |A|\}$
- $A$  : リンク  $a$  の集合
- $q^{rs}$  : OD ペア  $(r, s)$  における OD 交通量
- $D$  : 大規模更新を必要とするリンク  $a$  の集合
- $E$  : 大規模更新を必要としないリンク  $a$  の集合
- $R$  : 起点  $r$  の集合
- $S$  : 終点  $s$  の集合
- $N$  : ノード  $n$  の集合
- $In(n)$  : ノード  $n$  に入るリンクの集合
- $Out(n)$  : ノード  $n$  から出るリンクの集合
- $j$  : 更新期間の識別子  $j = \{1, 2, 3 \dots |J|\}$
- $J$  : 更新期間  $j$  の集合
- $\eta$  : 規制状態の時限識別子 ( $\eta = 1$ : 通行止めと車線規制の同時実施時限,  $\eta = 2$ : 車線規制のみの実施時限)
- $t_a$  : リンク  $a$  の所要時間
- $t_{a0}$  : リンク  $a$  のフリーフロー所要時間
- $c_{ja}^\eta$  : リンク  $a$  の更新期間  $j$ , 規制方法  $\eta$  における交通容量
- $\alpha, \beta$  : BPR 関数のパラメータ
- $x_a^r$  : リンク  $a$  の起点別リンク交通量
- $x^r$  : 起点別リンク交通量の期待値
- $\theta$  : 分散パラメータ
- $\delta^{rk}$  :  $r = k$  で 1, それ以外で 0 をとる変数
- $\delta^{sk}$  :  $s = k$  で 1, それ以外で 0 をとる変数
- $\hat{x}_{aj}^\eta$  : 更新期間  $j$  時限  $\eta$  で大規模更新を実施したときのリンク  $a$  の均衡交通量
- $\hat{t}_{aj}^\eta$  : 更新期間  $j$  時限  $\eta$  で大規模更新を実施したときのリンク  $a$  の均衡時所要時間
- $\bar{x}_{aj}^\eta$  : 通常時の更新期間  $j$  時限  $\eta$  のリンク  $a$  の均衡交通量

表-1 車線規制における大規模更新スケジュール

車線規制		大規模更新対象リンク		
更新期間	時限	A	B	C
1	1	1	0	0
	2	1	0	0
2	1	0	0	0
	2	0	0	0
3	1	0	1	0
	2	0	1	0

表-2 通行規制における大規模更新スケジュール

通行止め		大規模更新対象リンク		
更新期間	時限	A	B	C
1	1	0	0	0
	2	0	0	0
2	1	0	0	0
	2	0	0	0
3	1	0	0	1
	2	0	0	0

- $y_{aj1}^\eta$  : リンク  $a$  が更新期間  $j$  時限  $\eta$  で車線規制のときに 1, それ以外で 0 をとる未知変数
- $y_{aj2}^\eta$  : リンク  $a$  が更新期間  $j$  時限  $\eta$  で通行止めのときに 1, それ以外で 0 をとる未知変数
- $\varepsilon$  : ごく小さな値
- $\tau_j^\eta$  : 更新期間  $j$  時限  $\eta$  の規制日数 (未知変数)
- $\mu_a^\eta$  : リンク  $a$  の大規模更新の時限  $\eta$  にかかる規制日数 (定数)

#### 3.2 確率的利用者均衡配分(下位問題)

まず、下位問題となる利用者の確率的均衡配分を定式化する。確率的利用者均衡配分は確率的配分と利用者均衡配分を統合したものである。確率的配分はリンクコストが一定のもとで利用者の経路選択を表し、非線形連立方程式として定義される。この確率的配分についてリンクコストをリンク交通量の関数としたものが確率的利用者均衡配分である。しかし、それらを直接的に解くことはできない。そのため、等価な最適化問題として式(1)のように書き換えられる。ここでは赤松ら<sup>4)</sup>を用いる。

$$z(x_j^\eta, c_j^\eta) = \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \{-HL(x^r) + HN(x^r)\} + \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (1)$$

式(2)を(3), (4), (5)を制約条件下で解くことで起点別リンク交通量が唯一に決まる。なお、リンク所要時間は式(6)のBPR 関数である。また、 $HL, HN$  は式(7), 式(8)の起点別リンク交通量で定義されたエントロピー関数である。

$$\min Z(x_j^\eta, c_j^\eta) \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{a \in In(n)} x_a^r - \sum_{a \in Out(n)} x_a^r + \sum_{s \in S} (\delta^{rk} \cdot q^{rs} - \delta^{sk} \cdot q^{rs}) = 0 \quad (3)$$

$$\forall k \in N$$

$$x_a = \sum_{r \in R} x_a^r \quad (4)$$

$$\forall a \in A$$

$$x_a^r \geq 0$$

$$\forall a \in A \quad (5)$$

where

$$t_a(x_a) = t_{a0} \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (6)$$

$$HN(x^r) \equiv - \sum_l \left( \sum_k x_k^r \right) \ln \left( \sum_k x_k^r \right) \quad (7)$$

$$HL(x^r) \equiv - \sum_l x_l^r \ln x_l^r \quad (8)$$

ここで、式(2)並びに式(3)-(5)の最適化問題を等価なアルゴリズムに置き換える。ここでは、Dial<sup>5)</sup>により考案されたアルゴリズムによってリンク交通量を計算する。そのリンク交通量を逐次平均法によって収束計算することで均衡解を求める。

### 3.3 総走行時間の増分の最小化の組み合わせ(上位問題)

次に上位問題の目的関数であるすべての大規模更新対象リンクの大規模更新が終了するまでの総走行時間の増分を定式化する。総走行時間の増分は大規模更新中の総走行時間と通常時の総走行時間の差で表現できるが、通常時の総走行時間は更新期間とその時限によらず定数となるため、等価な問題として式(9)のように帰着できる。したがって、大規模更新スケジュールの最適化問題は下記の式(9)-(15)に示すように定式化できる。

$$\min_{y, \tau} \sum_{j \in J} \sum_{\eta \in \{1,2\}} \sum_{a \in A} \hat{x}_{aj}^\eta \cdot \hat{t}_{aj}^\eta \cdot \tau_j^\eta \quad (9)$$

subject to

$$\hat{x}_{aj}^\eta = \arg \min_{j \in J, \eta \in \{1\}} Z(x_j^\eta, c_j^\eta) \quad (10)$$

$$c_j^\eta = \{c_1^{j\eta}, c_2^{j\eta}, \dots, c_{|A|}^{j\eta}\} \quad (11)$$

$$x_j^\eta = \{x_1^{j\eta}, x_2^{j\eta}, \dots, x_{|A|}^{j\eta}\} \quad (12)$$

$$c_{ja}^\eta = c_{a0} - \frac{c_{a0}}{2} \cdot y_{aj1}^\eta - \gamma_a \cdot y_{aj2}^\eta$$

$$\forall a \in D, \eta \in \{1,2\}, j \in J \quad (13)$$

where

$$\gamma_a = c_{a0} - \varepsilon \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{\eta \in \{1,2\}} (y_{aj1}^\eta + y_{aj2}^\eta) = \begin{cases} 1 & \text{if } a \in D \\ 0 & \text{if } a \in E \end{cases}$$

$$\forall a \in A$$

$$\mu_a^\eta y_{aj1}^\eta + \mu_a^\eta y_{aj2}^\eta \leq \tau_j^\eta \quad (15)$$

$$\forall a \in D$$

$$y_{aj1}^\eta \in \{0,1\}, y_{aj2}^\eta \in \{0,1\}, y_{aj2}^\eta = 0 \quad (16)$$

$$\forall a \in D, j \in J$$

$$\tau_j^\eta \geq 0 \quad \forall \eta \in \{1,2\}, j \in J \quad (17)$$

式(10)は大規模更新スケジュールの戦略によって下位問題で計算されたリンク交通量が総走行時間を計算する上位問題でのリンク交通量であることを表す。式(11)は更新期間の各時限における交通容量を表す。(12)は更新期間の各時限におけるリンク交通量の変化を表す。(13)は更新期間の各時限における交通容量の変化を表す。通常時、交通容量は変化せず、車線規制による大規模更新のとき、交通容量は通常時の半分となる。また、通行止めによる大規模更新のとき、交通容量は通常時の半分となる。式(14)は式(11)の交通容量の変化に関する制約を表す。式(15)は各時限で車線規制による大規模更新の時限にかかる規制日数と各時限で通行止めによる大規模更新の時限にかかる規制日数の和が更新期間の時限の規制日数より小さいことを表す。つまり、各時限の大規模更新が更新期間の時限の規制日数以内で完了することを表す。式(16)は更新期間の各時限で大規模更新によって実施される規制を表す。車線規制での大規模更新は時限に依らず、実施の有無を選択できることを表す。通行止めでの大規模更新は時限が1のとき、実施の有無を選択できることを表す。通行止めでの大規模更新は時限が2のとき、実施はできないことを表す。式(17)は更新期間の各時限での規制日数が非負制約であることを表す。

### 4. まとめ

本研究では、大規模更新での車線規制や通行止めによる交通容量減少に伴う総走行時間の増分の最小化を図る大規模更新スケジュールのモデルを示した。試算の結果については講演会で報告する。

大規模更新では対象となる構造物の工期はそれぞれ異なる。しかし、本研究では、大規模更新による規制日数を更新期間内としている。したがって、車線規制と通行止めによる大規模更新を同時に実施する時限は車線規制の日数で決まる。よって、車線規制による大規模更新の規制日数が余剰となる非効率的な大規模更新スケジュールも解となる。また、車線規制の際は同一更新期間内での大規模更新となっている。そのため、他の更新期間の時限では大規模更新ができない。したがって、今後は時限や機関に設けている他のリンクとの関係性を制約する条件を拡張し、より現実的な大規模更新スケジュールを立案可能なモデルの開発を目指す。

### 参考文献

- 1) 国土交通省：令和元年度版 国土交通白書，<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h30/hakusho/r01/pdf/npzentai.pdf> (2019.11.20 閲覧)

- 2) 松坂敏弘, 森山陽一, 小笹浩司, 太田秀樹, 藤野陽三, 宮川豊章, 西村和夫: 高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題, 土木学会論文集 F4, 73 卷 1 号, 1-18, 2017
- 3) Ma, J., Cheng, L., Li, D.: Road Maintenance Optimization Model Based on Dynamic Programming in Urban Traffic Network, Journal of Advanced Transportation, Vol. 2018, 2018
- 4) 赤松隆, 土屋雄二, 川上喜博: 確率的均衡配分の効率的計算法の開発, 交通工学, 第 26 卷 1 号, pp. 89-96, 1991
- 5) Dial, R.B: A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration. Transportation Research Vol. 5, pp. 83-111, 1971