

大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画 最適化のためのネットワークデザイン問題

三輪 三太¹・杉浦 聡志²

¹ 学生会員 北海道大学大学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目)

E-mail: t3t-ttt@eis.hokudai.ac.jp

² 正会員 北海道大学大学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西 8 丁目)

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

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老朽化、およびその対応が課題となっている。今後も多数の道路構造物によって構成される道路の大規模修繕・更新の事業増大が見込まれている。道路の大規模修繕・更新事業は、長期に渡って車線規制や通行止めにより交通容量を低減させ、迂回や混雑が道路ネットワークの利用者に及ぶ影響を考慮した計画が必要となろう。本研究は、ネットワーク上の複数道路区間に大規模修繕・更新が予定される状況を想定し、施工区間の規制方法とその日程の組み合わせを考える。この問題を、ネットワークデザイン問題として記述し、利用者に与える影響を最小化する大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画を求解するモデルを構築した。構築したモデルを小規模ネットワークに適用し、モデルの挙動を確認する。

Key Words: Long-term Road Facilities Rehabilitation, Traffic Restriction Schedule, Network Design Problem

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老朽化が問題となっている。交通機能と空間機能の役割を通して社会・経済活動を支える道路も例外ではない。特に道路を構成する代表的な道路構造物であるトンネルや道路橋の老朽化に着目すると、建設後 50 年となる割合は 2018 年度では、トンネルで約 20%、道路橋で約 25%である。しかし、2033 年度には、トンネルで約 42%、道路橋で約 63%に達すると見込まれる¹⁾。また、ほとんどが道路構造物で構成される高速道路については供与開始から 30 年以上経過した割合が全体の 4 割を占める。2050 年度には、供与開始から 50 年以上経過した割合が全体の 8 割弱に達すると見込まれる²⁾。これらのことから、道路構造物の更新工事が、今後増大することが予想される。しかしながら、道路構造物の更新工事では、通常の道路の補修工事とは異なり、橋梁の架け替えや、トンネル覆工の剥落防止などが実施される。したがって、更新工事対象となる道路構造物で構成される道路では長期に渡る車線規制や通行止めにより交通容量が低減する。また、車線規制や通行止めに伴い、混雑や迂回が生じる。特に複

数箇所にて道路構造物の更新工事が予定されている場合、更新工事の実施順と規制方法の組み合わせによって利用者に与える影響が変わる。そこで、更新工事時には更新工事対象となる道路構造物で構成される道路のみならず道路ネットワーク(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。したがって、道路管理者はネットワーク全体の視点に立って、更新工事の実施順並びに規制方法を考慮した規制スケジュール計画を立てることが求められる。

例えば、図-1 のサンプルネットワークにおいて、赤色で示された道路区間 1, 4 において通行止めによる更新の工事实施を考える。更新工事に伴う規制日数が同じであるとき、道路区間 1 と 4 を同時に実施することで、ネットワーク全体の視点から効率よく更新工事を実施できる。しかし、膨大な経路数が存在する現実のネットワークにおいて、複数箇所にて道路構造物の更新工事が予定されている場合、道路管理者にとってネットワーク全体の利用者に与える影響を最小化する実施順と規制方法の組み合わせを考えることは難しい。現状では、道路の上下線を交互に、もしくは上下線を同時に車線規制を行い、更新工事を順番に実施する場合はほとんどである。

そのため、同時に複数箇所の更新工事を実施することで利用者に与える影響をより小さくする更新工事の実施順と規制方法の組み合わせを排除している可能性がある。また、更新工事の実施順と規制方法の組み合わせが利用者に与える影響を定量的に評価し、規制スケジュール計画を立案する手法は筆者の知る限り見当たらない。

以上のような背景を踏まえて、道路構造物で構成される道路を対象とした更新工事を大規模修繕・更新と定義する。本研究では、ネットワーク上にて複数箇所、大規模修繕・更新する予定を考える。また、大規模修繕・更新に伴う規制方法も考慮する。そして、ネットワークデザイン問題(以下、NDP)として利用者への影響を最小化する大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画を求解するモデル(以下、大規模修繕・更新 NDP モデル)を提案する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

更新工事による道路(以下、リンク)の通行止めやリンクの交通容量の減少による総走行時間増分の最小化を目的とした NDP の既往研究は以下が挙げられる。清田³⁾らは総走行時間を最小にするリンクの更新工事の組み合わせを混合整数計画問題として求解するモデルを提案している。しかし、この研究では規制方法は通行止めのみを想定している。また、リンクの所要時間関数が交通量に依存せず、経路選択に均衡状態を想定していない。杉浦⁴⁾らは道路の廃止を考慮した NDP を定式化し、線形計画問題として求解するモデルを提案している。経路選択には、利用者均衡を仮定しており、上位問題には総走行時間と維持管理費用の和の最小化するリンクを探索する。しかしながら、ある 1 時点の最適な道路網形状を出力することは可能ではあるが、時間軸を考慮してスケジュールを提案できるような枠組みとはなっていない。Ma et al.⁵⁾は総走行時間増分を最小化する更新計画を求解する Bi-Level 問題を提案している。経路選択には、利用者均衡を仮定しており、上位問題には総走行時間増分を最小化する規制区間の組み合わせを動的計画法により探索する。規制方法は通行止めのみを想定し、リンク 2 つずつを組み合わせた同時更新工事計画のみが出力される。

本研究では、利用者の経路選択に、確率的利用者均衡(以下、SUE)を仮定した Bi-level 問題として規制スケジュール計画問題を定式化する。このとき、同時に大規模修繕・更新できるリンクの組み合わせ数を制限しない。さらに規制方法は車線規制と通行止めの 2 種類の規制方法を考える。

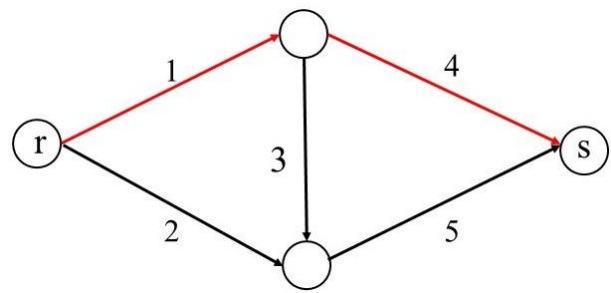


図-1 サンプルネットワーク

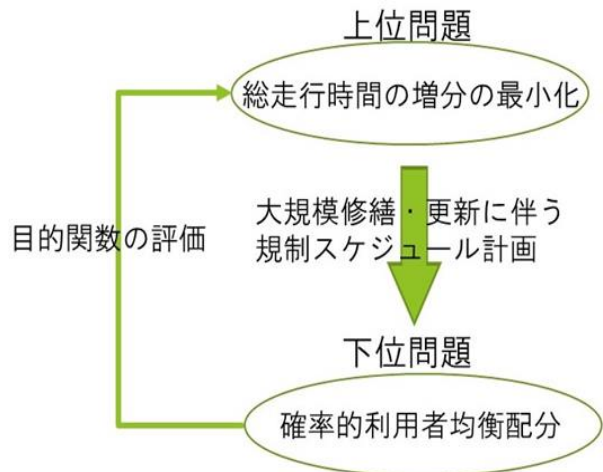


図-2 大規模修繕・更新 NDP モデル

3. 大規模修繕・更新 NDP モデルの概要

(1) 大規模修繕・更新 NDP モデルの構築概要

本研究で考える NDP では道路管理者がネットワークにおける大規模修繕・更新対象リンクの事業日程を決定し、その事業による規制下で SUE による経路選択が行われると仮定をおく。この問題は図-2 に示すような Bi-level 問題として記述できる。上位問題の目的関数は通常時、すなわちいずれのリンクも規制がない状態と比較したネットワークの総走行時間増分と定義する。したがって、本研究での大規模修繕・更新 NDP 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) モデルにおける仮定

本研究のモデルの構築における仮定を以下に示す。大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画は離散的な順序をもつ期間で設定し、これを更新期間と定義する。大規模修繕・更新対象リンクはこのいずれかの更新期間内で大規模修繕・更新が必ず実施される。ここで、更新期間は同一更新期間内にて実施される大規模修繕・更新対象リンクのうち規制日数が最大となるものである。規制方法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が 0 となる通行止めの 2 種類を考え

る。通行止めによる規制を考える利点として、通行止めによる大規模修繕・更新は規制日数が、施工ヤードや物資の搬入が容易となるため、車線規制に比べて一般的に短くなる。そこで、各大規模修繕・更新対象リンクの通行止めの規制日数は車線規制の日数よりも短いと仮定する。これらの規制は更新期間に渡って継続し、1つのみ選ばれる。同一更新期間内におけるリンクの大規模修繕・更新は同時に開始し、規制は最大規制日数のリンクが大規模修繕・更新を終了するまで、その他のリンクも解消されないと仮定する。

ただし、同一更新期間内に車線規制と通行止めによる大規模修繕・更新をそれぞれ実施する2つのリンクがある場合、更新期間は車線規制の最大規制日数になると考えられる。しかしながら、両者の施工日程に大きな差がある場合には、先に工事が終了した区間の規制を解消しなければ、むやみに利用者への影響を与える。そこで、同一更新期間内を2つの期間に分け、これを時限と定義する。1つ目の時限は通行止めと車線規制による大規模修繕・更新を同時に実施する。2つ目の時限は1つ目の時限で未了である車線規制による大規模修繕・更新を引き続き、実施する。ここで、1つ目の時限は通行止めの規制日数である。ある時限で複数リンクを通行止めによる大規模修繕・更新を実施する場合、時限は通行止めの規制日数のうち最大となるものとする。2つ目の時限は車線規制における最大規制日数と1つ目の時限の差となる。また、同一時限内におけるリンクの大規模修繕・更新は同時に開始する。規制について、1つ目の時限は通行止めの最大規制日数のリンクが大規模修繕・更新を終了するまで他のリンクの規制も解消されない。2つ目の時限は、通行止めの規制は解消されるが、車線規制にて、大規模修繕・更新を実施するリンクは2つ目の時限中は解消されない。

なお、同一更新期間内で複数リンク大規模修繕・更新を実施する場合、通行止めとなるリンクの規制日数が最大であった場合、1つ目の時限で通行止めと車線規制の大規模修繕・更新を実施し、2つ目の時限では、いずれのリンクも大規模修繕・更新を実施しないものとする

また、各規制における規制日数は道路管理者が工法、工費などを踏まえて最適な規制日数が事前に決定されているものとする。

上記の仮定を整理して、大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画の出力例を示す。例として、あるネットワーク上で表-1のようにリンクA,B,C,D,E,Fの大規模修繕・更新計画を考える。行を大規模修繕・更新対象リンク、列を更新期間と時限とする。ここで、黄色のセルは車線規制を、赤色のセルは通行止めを表す。このような規制スケジュール計画における規制下で、各更新期間もしくは各時限における総走行時間増分を計算し、全

表-1 大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール

更新期間	1		2		3	
	1	2	1	2	1	2
リンク	A	車線規制				
	B	車線規制				
	C	通行止				
	D			通行止		
	E					車線規制
	F					車線規制

期間の総走行時間増分の総和を求める。通常、大規模修繕・更新はリンクの上下線を交互に、もしくは上下線同時に規制し、大規模修繕・更新を順番に実施される。したがって、上記のように同時に大規模修繕・更新を実施する組み合わせを考えることで大規模修繕・更新に伴う規制がない期間が生じる。このように全期間の総走行時間増分の総和が最小となる規制スケジュール計画を求解することで利用者に与える影響を最小化できる。

(3) モデルの定式化

a) 記号の定義

モデルの定式化で用いる記号の定義を以下で示す。

- a : リンクの識別子
- A : リンク $a = \{1,2,3 \dots |A|\}$ の集合
- D : 大規模修繕・更新を必要とするリンク a の集合
- D^c : 大規模修繕・更新を必要としないリンク a の補集合
- R : 起点 r の集合
- S : 終点 s の集合
- n : ノードの識別子
- N : ノード $n = \{1,2,3 \dots |N|\}$ 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 : 更新期間 $j = \{1,2,3 \dots |J|\}$ の集合
- q^{rs} : OD ペア (r,s) における OD 交通量
- W : OD ペア (r,s) の集合
- 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
- x_a^r : リンク a の起点別リンク交通量
- \mathbf{x}^r : 起点別リンク交通量ベクトル
- θ : 分散パラメータ
- δ^{rk} : $r = k$ で 1, それ以外で 0 をとる変数
- δ^{sk} : $s = k$ で 1, それ以外で 0 をとる変数
- x_a^N : 通常時のリンク a の均衡交通量
- t_a^N : 通常時のリンク a の均衡時所要時間
- c_{a0} : 通常時のリンク a の交通容量
- ε : ごく小さな値
- \mathbf{x}_j^η : 更新期間 j , 時限 η におけるリンク交通量のベクトル
- \mathbf{c}_j^η : 更新期間 j , 時限 η におけるリンク交通容量のベクトル

- μ_a^{link} : リンク a が通行止めで大規模修繕・更新を実施した際の規制日数 (定数)
 μ_a^{lane} : リンク a が車線規制で大規模修繕・更新を実施した際の規制日数 (定数)
 T : 大規模修繕・更新プロジェクト期間
 η : 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)
 M : 更新期間 j , 時限 η にて車線規制で大規模修繕・更新を実施するときのリンク a の集合
 Q : 更新期間 j , 時限 η にて通行止めで大規模修繕・更新を実施するときのリンク a の集合
 V : 更新期間 j , 時限 η で大規模修繕・更新対象リンクが大規模修繕・更新を実施しないときのリンク a の集合
 c_{ja}^η : リンク a の更新期間 j , 時限 η における交通容量
 \hat{x}_{aj}^η : 更新期間 j , 時限 η で大規模修繕・更新を実施したときのリンク a の均衡交通量
 \hat{t}_{aj}^η : 更新期間 j , 時限 η で大規模修繕・更新を実施したときのリンク a の均衡時所要時間
 y_{1aj}^η : リンク a が更新期間 j , 時限 η で車線規制のときに 1, それ以外で 0 をとる未知変数
 y_{2aj}^η : リンク a が更新期間 j , 時限 η で通行止めのときに 1, それ以外で 0 をとる未知変数
 τ_j^η : 更新期間 j , 時限 η の規制日数 (未知変数)

b) 下位問題の定式化

大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画によってリンク交通量と交通容量は更新期間もしくは時限ごとに变化する。したがって、変数はリンク交通量とリンク交通量となることから下位問題の SUE 配分は以下で定式化される。

$$\min Z(\mathbf{x}_j^\eta, \mathbf{c}_j^\eta) = \frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \{-HL(\mathbf{x}^r) + HN(\mathbf{x}^r)\} + \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in In(n)} x_a^r - \sum_{a \in Out(n)} x_a^r + \sum_{s \in S} (\delta^{rk} \cdot q^{rs} - \delta^{sk} \cdot q^{rs}) = 0 \quad (2)$$

$$\forall r \in R, \forall k \in N, \forall (r, s) \in W$$

$$x_a = \sum_{r \in R} x_a^r \quad (3)$$

$$\forall a \in A, \forall r \in R$$

$$x_a^r \geq 0 \quad (4)$$

$$\forall a \in A, \forall r \in R$$

where

$$t_a(x_a, c_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (5)$$

$$HN \equiv - \sum_{a \in Out(n)} \left(\sum_k x_a^r \right) \ln \left(\sum_k x_a^r \right) \quad (6)$$

$$\forall r \in R, k \in N$$

$$HL \equiv - \sum_{a \in Out(n)} x_a^r \ln x_a^r \quad (7)$$

$$\forall r \in R$$

本研究では、式(1)と制約条件式(2)-(4)で定式化された数理最適化問題を Dial⁹⁾のアルゴリズムを用いてリンクフロー、リンク所要時間を求める。収束計算には、Fisk⁷⁾の逐次平均法(Method of Successive Averages)を用いる。

c) 上位問題の定式化

上位問題の目的関数である総走行時間増分は大規模修繕・更新プロジェクト期間中における大規模修繕・更新実施時の総走行時間と大規模修繕・更新プロジェクト期間中の通常時の総走行時間の差の最小化問題として定式化する。ただし、大規模修繕・更新プロジェクト期間中の通常時の総走行時間は更新期間によらず定数となるため、等価な問題として式(8)に帰着し、制約条件式(9)-(18)の下で解くことで求める。

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{\eta = \{1,2\}} \sum_{a \in A} \hat{x}_{aj}^\eta \cdot \hat{t}_{aj}^\eta \cdot \tau_j^\eta + \sum_{a \in A} x_a^N \cdot t_a^N \cdot \left(T - \sum_{j \in J} \sum_{\eta = \{1,2\}} \tau_j^\eta \right) \quad (8)$$

subject to

$$\hat{x}_{aj}^\eta = \arg \min_{j \in J, \eta \in \{1,2\}} Z(\mathbf{x}_j^\eta, \mathbf{c}_j^\eta) \quad (9)$$

$$\mathbf{x}_j^\eta = \{x_{1j}^\eta, x_{2j}^\eta, \dots, x_{|A|j}^\eta\} \quad (10)$$

$$\mathbf{c}_j^\eta = \{c_{1j}^\eta, c_{2j}^\eta, \dots, c_{|A|j}^\eta\} \quad (11)$$

$$c_{aj}^\eta = c_{a0} - \frac{c_{a0}}{2} \cdot y_{1aj}^\eta - \gamma_a \cdot y_{2aj}^\eta \quad (12)$$

$$\forall a \in A, \eta \in \{1,2\}, j \in J$$

where

$$\gamma_a = c_{a0} - \varepsilon$$

$$y_{1aj}^\eta \in \{0,1\}, y_{2aj}^\eta \in \{1\}, y_{2aj}^\eta \in \{0\} \quad (13)$$

$$\forall a \in A, \eta \in \{1,2\}, j \in J$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{\eta = \{1,2\}} (y_{1aj}^\eta + y_{2aj}^\eta) = \begin{cases} 0, & a \in D^c, D^c \subseteq A \\ 0, & a \in V, V \subseteq D \\ 1, & a \in Q, Q \subseteq D \\ 2, & a \in M, M \subseteq D \end{cases} \quad (14)$$

$$\eta \in \{1,2\}, j \in J$$

$$\sum_{\eta=\{1,2\}} y_{1aj}^{\eta} = 2 \quad (15)$$

$$\forall a \in M, \eta \in \{1,2\}, j \in J$$

$$\tau_j^1 = \min_{a \in D, j \in J} \left\{ \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \frac{\mu_a^{lane}}{2} \cdot y_{1aj}^1 \right\}, \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{link} \cdot y_{2aj}^1 \right\} \right\}$$

$$\tau_j^1 = \max \left\{ \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{lane} \cdot y_{1aj}^1 \right\}, \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{link} \cdot y_{2aj}^1 \right\} \right\} \quad (16)$$

where

$$\max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{lane} \cdot y_{1aj}^1 \right\} < \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{link} \cdot y_{2aj}^1 \right\}$$

$$\tau_j^2 = \max_{a \in D, j \in J} \left\{ \mu_a^{lane} \cdot y_{1aj}^2, \mu_a^{link} \cdot y_{2aj}^2 \right\} - \tau_j^1 \quad (17)$$

where

$$\tau_j^2 < 0 \Rightarrow \tau_j^2 = 0$$

$$T = \sum_{a \in D} \max \{ \mu_a^{link}, \mu_a^{lane} \} \quad (18)$$

式(9)は大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画にしたがって SUE 配分された下位問題のリンク交通量が上位問題でのリンク交通量であることを表す。式(10)は更新期間 j 、時限 η におけるリンク交通量のベクトルを表す。式(11)は更新期間 j 、時限 η におけるリンク交通容量のベクトルを表す。式(12)は更新期間 j 、時限 η における交通容量を表す。大規模修繕・更新不実施時、交通容量は変化しない。車線規制による大規模修繕・更新実施時、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修繕・更新実施時、リンク交通容量は0となる。式(13)更新期間 j 、時限 η におけるリンク交通容量の変化に関するバイナリ変数を表す。式(14)は大規模修繕・更新対象リンクに関して1つの更新期間または時限で通行止めと車線規制の2つの規制はとれないことを表す。式(15)は車線規制による大規模修繕・更新は同一更新期間内で実施されることを表す。式(16)は1つ目の時限の規制日数を表す。式(17)は2つ目の時限の規制日数を表す。式(18)は大規模修繕・更新プロジェクト期間が各大規模修繕・更新対象リンクの規制日数が大きい規制方法の規制日数の和で決まることを表す。

(5) 計算方法

総走行時間増分を最小化する大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画を求解するにあたって、その実施順と規制方法における全ての組み合わせを考えて、厳密解を出力することは現実のネットワークでは計算負荷の観点から困難であろう。そこで、本研究では、メタヒューリスティックアルゴリズムであるタブーサーチを用いて、近似解を出力する。まず、初期解として各リンクの上下線を順番に通行止めにて大規模修繕・更新する規制

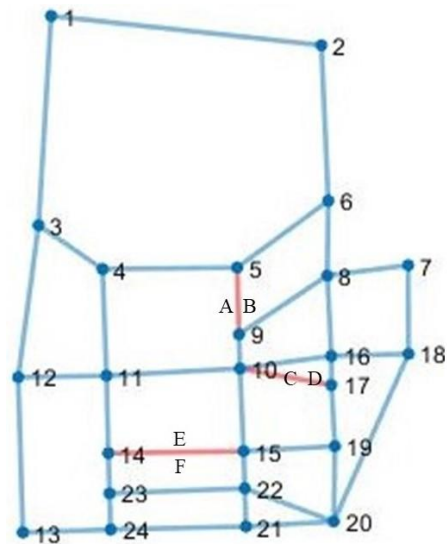


図-3 大規模修繕・更新対象リンク

スケジュール計画を与える。そのときの各時限における総走行時間増分計算し、目的関数である全期間における総走行時間増分の総和を求める。次に、大規模修繕・更新対象リンクをランダムに1つ選択する。選択されたリンクが属する現在の更新期間の順序から1引いた数だけ解の候補を生成する。このとき、選択されたリンクが現在の更新期間と時限から他のどの更新期間と時限に移るかをランダムに候補を設定する。ここで、現在の更新期間の順序よりも後の更新期間には移れないこととする。生成された解の候補について、総走行時間増分をそれぞれ計算し、最小値をその繰り返し回における暫定解とする。ここで、得られた暫定解をもとにタブーリストを作成する。最適解をそれまでに見つかっている最小の総走行時間増分と比較し、値が小さいか、タブーリストに存在しない解のとき最適解として更新する。以上の手順を繰り返し、総走行時間増分が最小となる大規模修繕・更新を実施する組み合わせを探索する。

4. 提案モデルによる試算

(1) 仮想ネットワークへの適用

提案モデルの挙動確認のため、24のノードと76の有向リンクから構成される図-3のSioux Fallsネットワーク⁸⁾を用いる。ODペアは528ペアとし、BPR関数のパラメータは $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$ とする。

(2) 試算条件

試算条件として、図-3のSioux Fallsネットワーク中の赤色で示したリンクを大規模修繕・更新に実施するケースを設定する。各リンクは上下線で存在し、車線規制、

表-2 規制日数

対象 リンク	通行止め		車線規制	
	パターン 1,2[日]	パターン1 [日]	パターン2 [日]	
A	50	125	250	
B	50	125	250	
C	70	175	350	
D	70	175	350	
E	90	225	450	
F	90	225	450	

表-3 総走行時間増分の比較

規制方法	パターン1	パターン2
各リンクを車線規制	3.38×10 ⁹ [時間]	6.75×10 ⁹ [時間]
各リンクを通行止め	5.56×10 ⁹ [時間]	5.56×10 ⁹ [時間]
各リンクの上下線を車線規制	2.85×10 ⁹ [時間]	5.70×10 ⁹ [時間]
各リンクの上下線を通行止め	4.72×10 ⁹ [時間]	4.72×10 ⁹ [時間]
提案モデルで導出された最適解	2.85×10 ⁹ [時間]	4.67×10 ⁹ [時間]

表-4 パターン1の提案モデルで導出された最適解

更新期間		1		2		3	
時限		1	2	1	2	1	2
リンク	A	車線規制					
	B	車線規制					
	C			車線規制			
	D			車線規制			
	E					車線規制	
	F					車線規制	

表-5 パターン2の提案モデルで導出された最適解

更新期間		1		2		3	
時限		1	2	1	2	1	2
リンク	A	通行止					
	B	通行止					
	C	車線規制					
	D	車線規制					
	E					通行止	
	F					通行止	

通行止めの規制日数ともに上下線で同じものとする。ここで、ノード5とノード9間の上下線のリンクをAとB、ノード10とノード17間をCとD、ノード14とノード15間をEとFとおく。このケースに対して表-2に示した車線規制の規制日数を通行止めの規制日数の2.5倍としたパターン1と5倍としたパターン2を設定する。まず、それぞれのパターンについて各リンクを車線規制、通行止めによって大規模修繕・更新を実施したときの総走行時間増分を計算する。次に各リンクの上下線を車線規制、通行止めによって大規模修繕・更新を実施したときの総

走行時間増分を計算する。最後に提案モデルで導出された最適解の総走行時間増分を求める。

(3) 試算結果

表-3よりパターン1における提案モデルで導出された最適解の総走行時間増分は2.85×10⁹ [時間]である。表-4はパターン1における提案モデルで導出された最適解である。1つ目の更新期間でリンクAとリンクBを、2つ目の更新期間でリンクCとリンクDを、3つ目の更新期間でリンクEとリンクFを車線規制で同時に大規模修繕・更新を実施している。したがって、最適解は各リンクの上下線ごとに車線規制によって大規模修繕・更新を実施する結果となった。表-3よりパターン2における提案モデルで導出された最適解の総走行時間増分は4.67×10⁹ [時間]である。表-5は提案モデルで導出された最適解である。表-5より1つ目の更新期間でリンクAとリンクBを上下線を通行止めで、リンクCとリンクDの上下線を車線規制で同時に大規模修繕・更新を実施している。2つ目の更新期間では、いずれのリンクも大規模修繕・更新を実施せず、3つ目の更新期間でリンクEとリンクFの上下線を通行止めで大規模修繕・更新を実施している。表-3のパターン2における他の規制方法と比較して、同時に大規模修繕・更新を実施する組み合わせを考えることで総走行時間増分を縮小していることが確認できる。2つのパターンを比較して、車線規制の規制日数と通行止めの規制日数の差が提案モデルで導出される最適解に影響を与えている。したがって、両者の差が大きいほど、複数のリンクを同時に大規模修繕・更新を実施することで総走行時間増分、すなわち、利用者に与える影響を小さくする。また、一時的にリンクが通行止めになるものの、両者の差が大きければ、大規模修繕・更新プロジェクト期間における総走行時間増分の最小化を考えたときに通行止めの規制も有効であると考えられる。ただし、この結果はこの試算条件において得られたものであり、ネットワーク条件、対象リンクなどの条件によって変化すると考えられる。

5. おわりに

本研究では、ネットワーク上にて複数箇所を大規模修繕・更新を予定している場合に、利用者に与える影響を最小化するモデルをネットワークデザイン問題として記述し、構築した。利用者に与える影響をネットワークの総走行時間増分と定義し、経路選択には、SUE配分を仮定した。上位問題は総走行時間増分を最小化する大規模修繕・更新の規制方法とその日程の組み合わせを考え、Bi-level問題として定式化した。提案したモデルを

Sioux Falls ネットワークに適用し、大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画を求解した。試算では、車線規制の規制日数を通行止めの規制日数の定数倍した 2 パターン想定し、モデルの有用性、挙動を確認した。

以下に今後の課題をまとめる。本研究では、大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画は離散的な順序をもつ更新期間と定義した。そのため、大規模修繕・更新は同時に実施される。また、同一更新期間内もしくは同一時限内の最大規制日数のリンクが大規模修繕・更新を終了するまで他のリンクも規制が解消されない。また、車線規制による大規模修繕・更新は同一更新期間ないしは時限での実施となる。つまり、大規模修繕・更新対象リンクの規制日数を分割し、他の更新期間での大規模修繕・更新の実施はできない。したがって、非効率的な大規模修繕・更新に伴う規制スケジュール計画も解となる。

また、車線規制による大規模修繕・更新と通行止めによる大規模修繕・更新では、工費がそれぞれ異なるが、本研究では、工費に対しては考慮していない。そこで、モデルの定式化を拡張し、利用者に与える影響のみならず、工費の差異も含めたモデルの拡張が必要であろう。

本研究は仮想ネットワークに適用したのみにとどまっている。現実のネットワークに提案モデルを適用し、導出される解の妥当性を確認する。

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> (2019.12.20 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 巻 1 号, pp. 1-18, 2017
- 3) 清田勝, 樗木武, 古賀信之, 田上博: 市街地を対象にした道路工事の同時着工グループ化に関する研究, 土木学会論文集, No.449/IV-17, pp. 227-230, 1992
- 4) 杉浦聡志, 御村まゆ, 高木朗義: 道路縮減のためのネットワークデザイン問題における付加的評価指標の導入, 土木学会論文集 D3, 74 巻 5 号, pp. 269-276, 2018
- 5) 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
- 6) Dial, R.B.: A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration. Transportation Research Vol.5, pp. 83-111, 1971
- 7) Fisk, C.S.: Some Developments in Equilibrium Traffic Assignment, Transportation Research Part B, Vol. 14B, pp. 243-255, 1980
- 8) Leblanc : An algorithm for the discrete network design problem, Transportation Science Vol. 9, no. 3, pp. 183-199, 1975

(?????. ?? ?? 受付)

A NETWORK DESIGN PROBLEM FOR TOWARDS TO OPTIMIZE TRAFFIC RESTRICION SCHEDULE OF LONG-TERM ROAD FACILITIES REHABILITATION

Santa MIWA and Satishi SUGIURA

In recent years, roads which is one of the social capitals were constructed during the period of high economic growth in Japan, have become deteriorated and, its countermeasures have become issues. It is expected that long-term road facilities rehabilitation will increase in the future. In long-term road facilities rehabilitation, lane closure and link closure will occur and, traffic capacity is reduced over a long period. It is necessary to consider the impact on users of the entire road network in terms of detour and congestion. In this study, it is assumed that long-term road facilities rehabilitation is planned at multiple road sections on the network. Considering the combination of the long-term road facilities rehabilitation and the regulation methods, this problem is described as a network design problem and, a model can solve the traffic restriction schedule of long-term road facilities rehabilitation that minimizes the impact on users. Apply the constructed model to a small network and confirm the behavior of the model.