利用者費用と規模の経済性を考慮した道路ネットワークの補修工事の最適実施計画

中里 悠人 [1]・水谷 大二郎 [2]・長江 剛志 [3]

[1]学生会員　東北大学大学院　工学研究科（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06）
E-mail: yuto.nakazato.s1@dc.tohoku.ac.jp
[2]正会員　東北大学助教　大学院工学研究科（〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06）
E-mail: daijiro.mizutani.a5@tohoku.ac.jp
[3]正会員　東北大准教授　大学院工学研究科（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814）
E-mail: nagae@tohoku.ac.jp

本研究は，高速道路などの道路ネットワークにおける，路線ごとや一定区間ごとの大規模な補修・修繕を対象とする．大規模修繕では各道路（リンク）において数週間から数ヶ月にわたって補修工事が行われ，工事期間中は交通規制により道路の交通容量が大きく低下する．利用者への影響を考慮すると，ネットワーク内で代替性のある道路を同じ時期に補修した場合，道路ネットワーク全体の交通容量が大きく低下するため，代替性のある道路は異なる時期に補修するのが望ましい．複数の近接する道路の補修工事を同時に行うことで，建設機材の運搬費用や道路の規制費用など補修工事の固定費用を削減できるため，隣接する道路は同じ時期に補修するのが望ましい．本研究では大規模修繕による利用者への影響と補修工事の規模の経済性を同時に考慮した，道路ネットワークの補修工事の最適実施計画を定式化し，上記 2 つの要素を同時に考慮した場合どのような補修工事の実施計画が望ましいかを解明する．

Key Words : *pavement management, life cycle cost, markov decision problem, decomposition*

1. はじめに

道路アセットを管理する際，その価値を最大化するようなアセットマネジメントを適切に実施することが望まれる．道路ネットワークを構成する個々の道路区間は，経年や使用によって不確実性を伴い劣化するため，道路ネットワークの長期管理問題を考えた場合，劣化に起因した事故やネットワークの途絶を未然に防ぐために，個々の道路区間に対する補修工事が繰返し必要となる．補修工事の実施に際して，工事費用や工事規制に起因した利用者費用が生じるため，これらの影響を考慮した補修工事の最適実施計画（以下，最適補修施策）を策定してゆくことが望ましい．

道路アセットのアセットマネジメント問題として，最適補修施策の導出を考えた際，道路ネットワークの個々のリンクの関連性を適切に考慮するためにネットワークレベルの最適化問題を取り扱わなければならないことも珍しくない．一般的に，ネットワークレベルの補修施策最適化問題は，組み合わせ爆発により，最適解を厳密解として求めることは困難である．それに対して，approximate dynamic programming (ADP) を用いた近似的解法 [1)]，費用最小化問題をラグランジュ双対として取り扱った解法 [2)]，簡便的ルールによる近似的解法 [3)]，遺伝的アルゴリズムなどのヒューリスティクスを用いた解法 [e.g. 4)] などが提案されている．

本研究では，このようなネットワークレベルの補修施策最適化問題の解法の 1 つとして，分散制御による近似的手法を提案する．その際，道路ネットワーク上での利用者費用と，固定費用に起因した補修工事の同期化による規模の経済性を，ネットワークレベルでの最適化問題を取り扱うことの必要性に関する要因として取り上げ，固定費用による規模の経済性を有する問題 [3)] を利用者費用も考慮できる枠組みに拡張して分析を行う．その上で，固定需要の単一 OD が最小費用流問題により配分されるようなシンプルな問題において，i）ネットワークレベルでの利用者費用，ii）補修費用の規模の経済性，の双方を考慮した最適補修施策を求めるための数理最適化モデルを定式化し，分散制御に基づく近似的解法を提案する．具体的には，Sioux Falls ネットワークにおいて，マルコフ連鎖モデルに従い個々のリンクの劣化が進展する状況への確率制御問題として最適補修施策決定問題を定式化する．その解法として，i）将来にわたる劣化過程の不確実性を考慮しない短期問題により，対象ネットワークを複数のサブネットワークに分割し，ii）サブネットワークの状態を近似的に表現するような状態空間のサイズの小さな状態変数を導入し，iii）サブネットワークの状態の組合せに対する状態依存型制御と個々のサブネットワークの状態定義の

ためのパラメータの同時最適化問題として近似的アルゴリズムを提案する．

以下，**2.** で，道路ネットワークの劣化・補修過程をモデル化する．**3.** で，分散制御の考え方に基づいて最適補修施策を導出するための提案アルゴリズムを説明する．**4.** で，数値計算事例により，提案アルゴリズムの実証分析を行いその有用性を分析する．**5.** で，本研究の結論と今後の課題を述べる．

2. 道路ネットワークの劣化・補修過程

(1) 時間軸の設定

複数の道路リンクによって構成される道路ネットワークの舗装の劣化・補修過程をモデル化する．道路ネットワークの建設されたカレンダー時刻 t_0 を起点とする離散的な時間軸を考える．道路ネットワークに対しては，t_0 から同じ時間間隔 d で全てのリンクで点検を行い，その直後すぐに補修工事を行うリンクを決定する必要がある．$z(z \in \mathbb{Z}^+)$ 回目の点検補修時刻を t_z とし，点検補修時刻の集合 $\mathcal{T}$ を定義する：

$$\mathcal{T} \equiv \{t_z | \forall z \in \mathbb{Z}^+\} \quad (1)$$

$$\text{where} \quad t_z = t_0 + z \times d \quad (2)$$

(2) 道路ネットワークの劣化状態

本研究では，対象とするネットワークを有向グラフ $\mathcal{G}(\hat{\mathcal{N}}, \mathcal{A})$ で表現する．$\hat{\mathcal{N}}$ はノード集合であり，要素数を $\hat{N}$ で表す．$\mathcal{A}$ はノードを繋げる有向リンク集合であり，その要素数を L で表す．

リンク $(i,j) \in \mathcal{A}$ の劣化度は，M 個の離散的なレーティングを表す状態変数 s_{ij} を用いて表現する：

$$s_{ij} = m \quad (3)$$

$$\text{where} \quad (i,j) \in \mathcal{A} \quad (4)$$

$$m \in \mathcal{M} \quad (5)$$

$$\mathcal{M} = \{1, 2, \cdots, M\} \quad (6)$$

$\mathcal{M}$ は劣化度の状態空間であり，m が大きいほど劣化が進んでいることを表す．以上より，道路ネットワーク全体の劣化度を，リンク $(ij) \in \mathcal{A}$ について並べた L 次元列ベクトル $\boldsymbol{s}$ として表現する：

$$\boldsymbol{s} \equiv [s_{ij}] \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A} \quad (7)$$

劣化度ベクトルの状態空間 $\mathcal{S}$ は各リンクの劣化度の直積で，$\mathcal{S} = \mathcal{M}^L$ と表記できる．

(3) 劣化過程モデル

まず，単一のリンクの劣化過程をモデル化する．補修前と補修後の劣化度を区別するため，時刻 $t \in \mathcal{T}$ において点検直後，補修直前の劣化度を $\boldsymbol{s}^-(t)$，補修直後の劣化度を $\boldsymbol{s}^+(t)$ と表す．舗装の劣化はリンクの交通量に関係せず，劣化度のみに影響されるとし，劣化過程を斉時マルコフ連鎖を用いて記述する．$z(z \in \mathbb{Z}^+)$ 回目の点検補修時刻 t_z から次の点検補修時刻 t_{z+1} までに，n 番目のリンクの劣化度 s_{ij} が $a(a \in \mathcal{M})$ から $b(b \in \mathcal{M})$ に遷移する確率を $p_{ij,ab}$ とする：

$$p_{ij,ab} = \mathrm{Prob}[s^-_{ij}(t_{z+1}) = b | s^+_{ij}(t_z) = a] \quad (8)$$
$$\forall z \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall a, b \in \mathcal{M}$$

自然劣化によって劣化度が小さくなる，すなわちリンクの状態が良くなることはあり得ないため，$b < a$ の時，$p_{ij,ab} = 0$ が必ず成立する．$p_{ij,ab}$ を用いて，a 行 b 列が $p_{ij,ab}$ のリンク (i,j) の劣化度のマルコフ推移行列 $\boldsymbol{P}_{ij}$ を定義する：

$$\boldsymbol{P}_{ij} \equiv [p_{ij,ab}] \quad \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (9)$$

道路ネットワーク全体では，z 回目の点検補修時点後の劣化度ベクトルが特定の $\boldsymbol{s}^* \in \mathcal{S}$ の時，$z+1$ 回目の点検時に劣化度ベクトルが特定の $\boldsymbol{s}^{**} \in \mathcal{S}$ になる確率は各舗装区間の劣化確率の積で表すことができる：

$$\mathrm{Prob}[\boldsymbol{s}^-(t_{z+1}) = \boldsymbol{s}^{**} | \boldsymbol{s}^+(t_z) = \boldsymbol{s}^*] \quad (10)$$
$$= \prod_{(i,j) \in \mathcal{A}} p_{ij, s^*_{ij} s^{**}_{ij}} \quad \forall z \in \mathbb{Z}^+$$

(4) 補修過程モデル

劣化したリンクに対して補修工事を行うことで劣化度が減少する (状態が良くなる)．本研究で考慮する補修工法は，劣化度が最小の 1 になる取換工法のみを考慮する．時刻 $t \in \mathcal{T}$ において，各リンクに対して補修を行うか否かを二値変数で表す補修ベクトル $\boldsymbol{\delta}(t)$ とすると，補修による劣化度の変化は以下のように表すことができる：

$$\boldsymbol{s}^+(t_z) = \boldsymbol{s}^-(t_z) - [\boldsymbol{s}^-(t_z) - \mathbf{1}] \circ \boldsymbol{\delta}(t_z) \quad (11)$$

$$\text{where} \quad \delta_{ij}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in \hat{\mathcal{A}} \quad (12)$$

3. 最適補修施策と近似的手法を用いた補修施策

(1) 維持管理の前提条件

点検で劣化度が最大の M であったリンクに対しては必ず補修工事を行う必要がある．時点 t でリンク ij に対して補修を行うか否かを補修ベクトル $\delta_{ij}(t)$ とすると，

$$\delta_{ij}(t) = 1 \quad \text{if} \quad s_{ij}(t) = M \quad (13)$$

$$\text{where} \quad \delta_{ij}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in \mathcal{A}, \forall t \in \mathcal{T} \quad (14)$$

が成立する必要がある．無限計画期間における期待ライフサイクル費用最小化問題は，マルコフ決定過程（MDP）となり，最適な補修ベクトルは時点 $t_z \in \mathcal{Y}$ に依存せず，その時点の劣化度ベクトル $\boldsymbol{s}$ にのみ依存す

る．本研究では，劣化度ベクトル $\boldsymbol{s} \in \mathcal{S}$ ごとの補修ベクトル $\boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{s})$ の集合を補修施策 $\boldsymbol{\Delta}$ とし，具体的には

$$\boldsymbol{\Delta} \equiv \{\delta(\boldsymbol{s}) | \forall s \in \mathcal{S}\} \tag{15}$$

$$\text{s.t.} \quad \delta_{ij}(\boldsymbol{s}) = 1 \quad \text{if} \quad s_{ij} = M \quad \forall (ij) \in \hat{\mathcal{A}} \tag{16}$$

と設定する．補修施策 $\boldsymbol{\Delta}$ を適用した場合の期待ライフサイクル費用は：

$$LCC(\boldsymbol{\Delta}) = \sum_{t_z \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1+\rho)^{t_z}} [u(\boldsymbol{\delta}) + r(\boldsymbol{\delta})] \tag{17}$$

$$\text{where} \quad \boldsymbol{s}_0 = \mathbf{1} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} &\text{Prob}[\boldsymbol{s}^-(t_{z+1}) = \boldsymbol{s}^{**} | \boldsymbol{s}^+(t_z) = \boldsymbol{s}^*] \\ &= \prod_{(i,j)\in\mathcal{A}} p_{ij,s^*_{ij}s^{**}_{ij}} \quad \forall z \in \mathbb{Z}^+ \end{aligned} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{s}^+(t_z) = \boldsymbol{s}^-(t_z) - [\boldsymbol{s}^-(t_z) - \mathbf{1}] \circ \boldsymbol{\delta}(t_z) \tag{20}$$

となる．目的関数に含まれる $u(\boldsymbol{\delta})$，$r(\boldsymbol{\delta})$ はそれぞれネットワークの利用者費用とネットワークの工事費用を意味する．

(2) ネットワークの利用者費用

ネットワークには常に F 種類の異なる起点と終点を持つ交通流が同時に存在する．各交通量のフローは常に一定であると仮定する．補修工事を行うリンクでは，交通規制により容量が大きく低下する．利用者は総通行費用が最小となるような経路を選択するが，フローが大きく，ネットワークで全てのフローをさばくことが不可能である場合，起点と終点を直接繋げる，通行費用が高いダミーリンクを経由する．ネットワーク全体の利用者費用は，全ての交通需要の最小費用流問題の解となる．

$f \in \mathcal{F} \equiv \{1, 2, \cdots, F\}$ 番目の交流は起点 $\hat{o}_f \in \hat{\mathcal{N}}$，終点 $\hat{d}_f \in \hat{\mathcal{N}}$，交通量 $\hat{T}_f$ と記述する．リンク (i, j) の通行費用と容量とはそれぞれ c_{ij}，μ_{ij} であるとする．既存のネットワークにダミーリンクを追加した新しいネットワークのリンク集合 $\hat{\mathcal{A}}^*$ は以下のように定義できる：

$$\hat{\mathcal{A}}^* \equiv \hat{\mathcal{A}} \cup \{(\hat{o}_f, \hat{d}_f) | \forall f \in \mathcal{F}\} \tag{21}$$

リンク (i, j) における f 番目の交通流のフローを $x_{ij,f}$ とすると，ネットワーク全体のフローは $\boldsymbol{x} \equiv \{x_{i,j,f} | \forall (i, j) \in \mathcal{A}, \forall f \in \mathcal{F}\}$ として定義できる．補修を行うリンクでは交通規制により，交通容量が $B(0 \leq B \leq 1)$ 倍になるとする．補修ベクトルが $\boldsymbol{\delta}$ の時，利用者費用 $u(\boldsymbol{\delta})$ は以下の最小費用流問題の解となる．

$$u(\boldsymbol{\delta}) = \min_{\boldsymbol{x}} \sum_{f\in\mathcal{F}} \sum_{(i,j)\in\hat{\mathcal{A}}^*} c_{ij} x_{ij,f} \tag{22}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad &\sum_{(i,j)\in\hat{\mathcal{A}}^* | j=n} x_{ij,f} - \sum_{(i,j)\in\hat{\mathcal{A}}^* | i=n} x_{ij,f} = \hat{A}_{f,n} \\ &\forall n \in \hat{\mathcal{N}} \quad \forall f \in \mathcal{F} \end{aligned} \tag{23}$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}} x_{ij,f} \leq \mu_{ij}(1 - (1 - B)\delta_{ij}) \quad \forall (i, j) \in \hat{\mathcal{A}} \tag{24}$$

$$x_{ij,f} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in \hat{\mathcal{A}} \tag{25}$$

$$\text{where} \quad \hat{A}_{f,n} = \begin{cases} \hat{T}_f & \text{if} \quad \hat{d}_f = n \\ -\hat{T}_f & \text{if} \quad \hat{o}_f = n \quad \forall n \in \hat{\mathcal{N}} \quad \forall f \in \mathcal{F} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{26}$$

$\hat{A}_{f,n}$ は，ノード n から流出する交通流 f のフローを意味する．式 (23) は，ノード n における各交通流のフロー保存則，式 (24) はリンクの容量制約であり，元のネットワークに含まれるリンクを流れる交通量の合計は容量以下であることを意味する．

(3) ネットワークの工事費用

補修で発生する費用は，補修するリンクの長さに比例する材料と人件費 (変動補修費用) と, 建設機材の運搬費用と交通規制の実施費用 (固定補修費用) の二つからなる．本研究では，補修するリンクの長さに比例して発生する変動補修費用と，工事に関連するリンクの数に比例する固定補修費用の 2 種類の費用を考慮する．リンク (i, j) の長さを l_{ij}，変動補修費用のリンクの長さに比例する費用係数を α，固定補修費用の関連リンク数に比例する費用係数を β とすると，工事費用 $r(\boldsymbol{\delta})$ は以下のように計算できる

$$r(\boldsymbol{\delta}) = \min_{b_n} \alpha \sum_{(i,j)\in\mathcal{A}} l_{ij}\delta_{ij} + \beta \sum_{n\in\hat{\mathcal{N}}} b_n \tag{27}$$

$$\text{s.t.} \quad b_i \geq \delta_{ij} \quad b_j \geq \delta_{ij} \quad \forall (i, j) \in \hat{\mathcal{A}} \tag{28}$$

$$b_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \in \hat{\mathcal{N}} \tag{29}$$

$$\text{where} \quad \delta_{ij}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in \hat{\mathcal{A}} \tag{30}$$

(4) 事後補修施策

事後補修施策とは，ネットワークで予防補修を行わずに，劣化度が最大の M となったリンクのみ補修工事を行う施策 Δ^0 は以下のように表記できる：

$$\boldsymbol{\Delta}^0 = \{\boldsymbol{\delta}^0(\boldsymbol{s}) | \forall \boldsymbol{s} \in \mathcal{S}\} \tag{31}$$

$$\text{where} \quad \delta^0_{i,j}(\boldsymbol{s}) = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad s_{i,j} = M \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{32}$$

(5) 最適補修施策

ネットワーク全体の長期的な割引利用者費用と補修工事費用を最小化する最適補修施策 $\mathbf{\Delta}^*$ は以下のように定式化される：

$$\mathbf{\Delta}^* = \arg\min_{\mathbf{\Delta}} LCC(\mathbf{\Delta}) \tag{33}$$

最適補修施策は価値反復法や政策反復法などのアルゴリズムを用いて計算することが可能であるが，実務規模の道路ネットワーク（リンクの数が二桁以上）では組み合わせ爆発により最適補修施策の計算が不可能である．

(6) 一括予防補修施策

ネットワークに対して工事を行うことで，ネットワーク全体の容量が低下する．ネットワークに含まれるリンク全体の劣化が進展している場合，ネットワークの容量が既に低下している可能性が高く，さらに近い将来複数回の補修工事が必要となる可能性が高い．この時大規模な予防補修を行い，複数のリンクを同時に補修することで．将来異なる時点で発生しうる工事をまとめて行うことで，容量が低下する回数を削減することと，それによって

一括予防補修施策では，ネットワークの「劣化が進展しているか」を，基準劣化度 $M^*(M^* < M)$ 以上のリンクの数が劣化ボーダーライン X を超えているかどうかで判定し，ネットワークの劣化が進展している場合は補修劣化度 m^* 以上のリンク全てに対して補修を行う．本研究では，基準劣化度 M^* は外生変数でありネットワーク $\mathcal{G}$ に対して，劣化ボーダーライン X，補修劣化度 m^* とした一括予防補修施策 $\mathbf{\Delta}^1(\mathcal{G}, X, m^*)$ は以下のように表現できる

$$\mathbf{\Delta}^1(\mathcal{G}, X, m^*) = \{\boldsymbol{\delta}^1(\boldsymbol{s}) | \forall \boldsymbol{s} \in \mathcal{S}\} \tag{34}$$

$$\text{where} \quad \delta^1_{ij}(\boldsymbol{s}) = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad s_{ij} = M \\ 1 & \text{if} \quad M^* \le s_{ij} < M \& \epsilon = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{35}$$

$$\epsilon = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad |s_{ij} \ge M^* \quad \forall(i,j) \in \hat{\mathcal{A}}| \ge X \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{36}$$

ここで，$|s_{ij} \ge m^* \quad \forall(i,j) \in \hat{\mathcal{A}}|$ は劣化度が M^* 以上のリンクの数を意味しており，ϵ は「ネットワーク全体の劣化が進展しているか」を示す 01 変数であり，ネットワーク全体の劣化が進展している場合は劣化度 M^* 以上のリンクに対して予防補修を行う．最適な劣化ボーダーライン X については，シミュレーションを用いて最適値を計算する．

(7) 分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策

一括予防補修施策では，複数のリンクの補修工事を同時に行われやすいが，利用者にとって代替性のあるリンクを同時に補修してしまう可能性が高い．そこで，ネットワークをあらかじめ同時補修が望ましい複数のサブネットワークに分割し，各サブネットワークごとに，全体の状態に応じた一括予防補修施策を適用する「分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策」を提案する．

劣化を考慮しない短期問題を用いたネットワークの分割方法について説明する．短期問題は期間 T のネットワークの費用最小化問題であり，ネットワークの各リンクは劣化せず，ただ期間 T 内に少なくとも一度補修工事を行う必要がある．短期問題は以下のように定式化できる：

$$\min_{\boldsymbol{\delta}_1, \boldsymbol{\delta}_2, \cdots, \boldsymbol{\delta}_{T^*}} \sum_{t=1}^{T} r(\boldsymbol{\delta}_t) + u(\boldsymbol{\delta}_t) \tag{37}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^{T} \delta_t = \mathbf{1} \tag{38}$$

$\boldsymbol{\delta}_1, \boldsymbol{\delta}_2 \cdots$ は，各期間における補修ベクトルであり，同じ期に補修されるリンクと，それらのリンクを含むノードを同じサブネットワークに分割する．

分割された D 個のサブネットワーク $\{\mathcal{G}_d(\hat{N}_d, \mathcal{A}_d), d \in \mathcal{D}\}, D \equiv \{1, 2, \cdots D\}$ に対して，分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策について説明する．各サブネットワークの状態を二つの変数で表現する：i）劣化度が最大の区間が存在するか ξ_d，ii）劣化が進展しているか ϵ_d．全サブネットワークの状態から，各サブネットワークの劣化ボーダーラインと基準劣化度を決める関数を f とする場合，分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策 $\mathbf{\Delta}^2(\mathcal{G}, f)$ は以下のように表現できる：

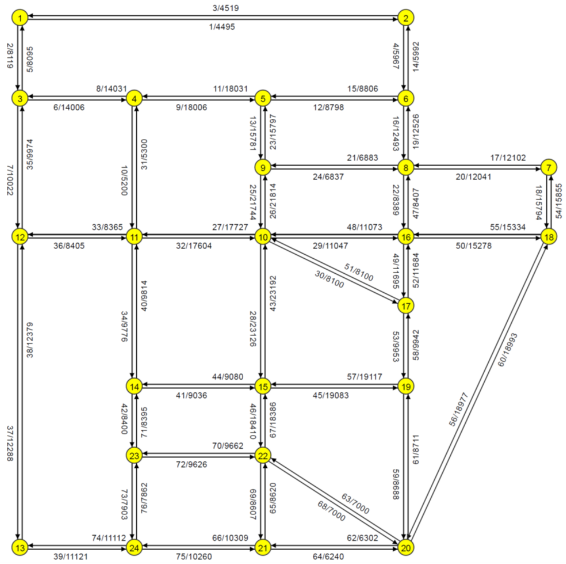
$$\mathbf{\Delta}^2(\mathcal{G}, f) \equiv \Pi_{d \in \mathcal{D}} \mathbf{\Delta}^1(\mathcal{G}_d, X_d, m^*_d) \tag{39}$$

$$f : \{(\xi_d, \epsilon_d), \forall d \in \mathcal{D}\} \to \{X_d, m^*_d \quad \forall d \in \mathcal{D}\} \tag{40}$$

$$\epsilon_d = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad \max[s_{ij}, \forall(i,j) \in \hat{N}_d] = M \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{41}$$

式 (39) は，ネットワーク全体に対する施策は，各サブネットワークごとの，一括予防補修施策に分割されることを意味する．式 (41) の ϵ_d は，サブネットワーク d 内に劣化度が最大の区間が存在するかの 01 変数であり，式 (40) は，f により各サブネットワークの状態に応じて劣化ボーダーライン X_d と補修劣化度 m^*_d を決定することを意味する．

各サブネットワークの劣化ボーダーライン X_d と関数 f については，シミュレーションでネットワーク全体の



図–1 Sioux Falls ネットワーク

表–1 計算パラメータ

	設定値
起点：$\hat{o}_f$	1
終点：$\hat{d}_f$	20
交通需要：$\hat{T}$	5000
ダミーリンクコスト：c	300
変動補修費用：α	100
固定補修費用：β	500
割引率：ρ	0.04
基準劣化度：M^*	3
短期問題の最大期間：T	2
マルコフ推移確率行列：$\boldsymbol{p}$	$\begin{matrix} 0.5115 & 0.3646 & 0.1056 & 0.0183 \\ 0 & 0.5757 & 0.3334 & 0.0890 \\ 0 & 0 & 0.6381 & 0.3619 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$

長期的な費用が最小となるような値を計算する．

4. 数値計算

数値計算事例において，i）事後補修のみを行う補修施策，ii）一括予防補修施策，iii）分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策の 3 種類の施策の比較を行い，予防補修による費用削減効果と，分散制御を用いることによる費用削減効果を分析する．分析は**図–1** の Sioux Falls ネットワークを対象としており，問題を簡単にするため，単一の OD ペアの問題を考慮する．計算パラメータは**表–1** の通りである．補修費用に関しては，総補修工事費用が利用者費用の約 1/100 になるように設定した．

(1) 各施策の費用比較

各種施策を適用した場合の，一期あたりの利用者費用と工事費用は**表–2** の通りである．予防補修を取り組むことで，工事費用は増加するが利用者費用を削減できる．特に分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策では，利用者費用を大幅に削減できる．

表–2 各施策を適用した場合の費用比較

	利用者費用	工事費用	合計費用
i）事後補修のみを行う補修施策	271,421.85	263,952.69	185,889.92
ii）一括予防補修施策	4,631.56	4,667.52	5,785.34
iii）分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策	276,053.41	268,620.21	191,675.26

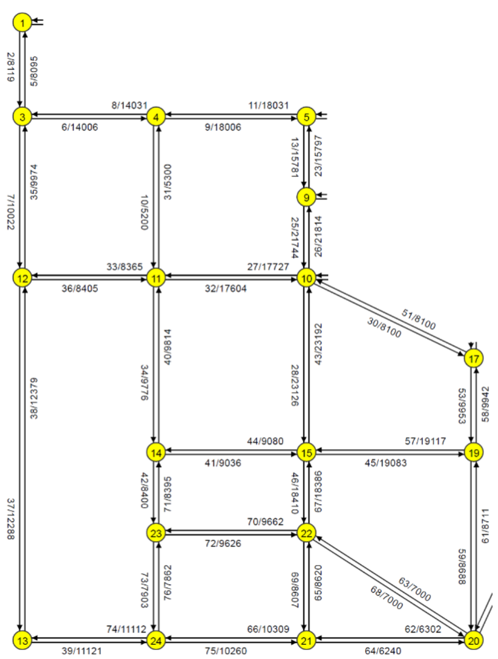
表–3 分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策：最適な劣化ボーダーライン

	劣化ボーダーライン
サブネットワーク 1	$X_1 = 7$
サブネットワーク 2	$X_2 = 2$

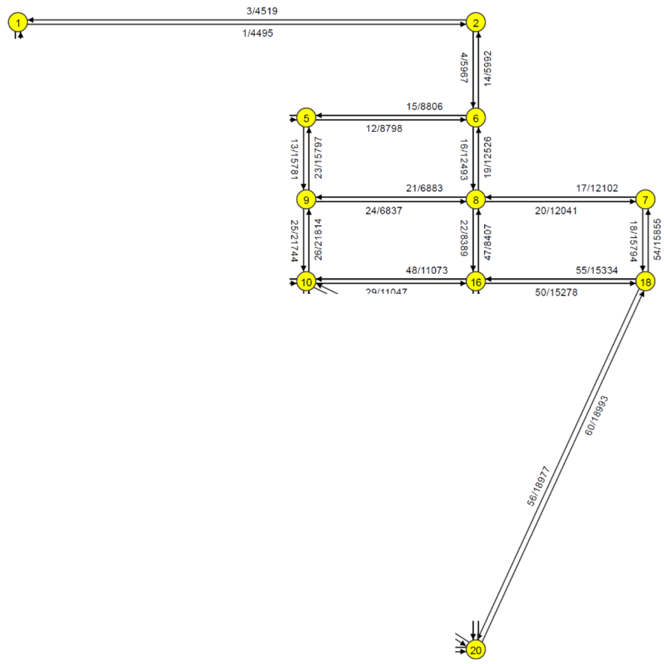
(2) 分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策の詳細

分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策では，ネットワークには**図–2** と**図–3** の二つのサブネットワークに分割された．分割されたサブネットワークに対する最適な分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策の詳細は**表–3** と**表–4** の通りである．

表–4 の各セルは全体の状態に応じた各サブネットワークにおいて適用する一括予防補修施策の補修劣化度の組み合わせを意味する．例として，表の一番右下のセルの値 (4, 3) は,「サブネットワーク 1 で劣化度が最大のリンクが存在しかつ劣化が進展していて，かつサブネットワーク 1 で劣化度が最大のリンクが存在しかつ劣化が進展している場合，サブネットワーク 1 では劣化度 4 以上のリンクを補修，サブネットワーク 2 では劣化度 3 以上のリンクを補修」を意味する．最適な補修劣化度の組み合わせでは，劣化度が最大のリンクが存在しているサブネットワークで優先的に予防補修が行われ，両ネットワークともに劣化が進展している場合はネットワーク 2 で優先的に予防補修が行われることが分かる．



図–2 サブネットワーク 1



図–3 サブネットワーク 2

表–4 分散制御を用いたサブネットワークごとの一括予防補修施策：最適な補修劣化度の組み合わせ

			サブネットワーク 2			
			$\xi_2 = 0$		$\xi_2 = 1$	
補修劣化度 (m_1^*, m_2^*)			$\epsilon_2 = 0$	$\epsilon_2 = 1$	$\epsilon_2 = 0$	$\epsilon_2 = 1$
サブネットワーク 1	$\xi_1 = 0$	$\epsilon_1 = 0$	(4, 4)	(4, 4)	(4, 4)	(4, 3)
		$\epsilon_1 = 1$	(4, 4)	(4, 3)	(4, 4)	(4, 3)
	$\xi_1 = 1$	$\epsilon_1 = 0$	(3, 4)	(4, 4)	(4, 4)	(4, 3)
		$\epsilon_1 = 1$	(3, 4)	(3, 4)	(4, 4)	(4, 3)

5. おわりに

本研究では，劣化過程の不確実性を考慮して，ネットワークレベルでの最適補修施策を導出するための方法論を提案した．具体的には，道路ネットワーク上の各リンクの代替性・補完性を考慮して，補修工事の際の利用者費用を算出し，利用者費用及び補修工事費用の規模の経済性を考慮して，最適補修施策を求めるための最適制御問題を定式化した．同問題の求解にあたり，組み合わせ爆発を回避するために，短期問題に基づき分析対象ネットワークをサブネットワークに分割し，各サブネットワークに対して近似的な最適補修施策を求めるための一括予防補修施策を導入した．その上で，サブネットワークごとに一括予防補修を実施するか否かを，各サブネットワークの状態の組合せごとに決定するような状態依存型補修施策を考え，当該補修施策とサブネットワークの状態を定義するための変数（ボーダーライン）を，モンテカルロシミュレーションに基づき同時に最適化するような近似的解法を提案した．提案方法論を，数値計算事例に適用し，ネットワーク分割により各サブネットワークに対して分散的に補修施策を決定してゆく提案方法論の有用性を確認した．今後の課題として，複数 OD を考慮するなどより現実的な維持管理問題を取り扱うことがあげられ，そのための解法の改善があげられる．

参考文献

1) Medury, A. and Madanat, S.: Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.33, pp.134-150, 2013.
2) Lee, J., Madanat, S. and Reger, D.: Pavement systems reconstruction and resurfacing policies for minimization of life-cycle costs under greenhouse gas emissions constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.93, pp.618-630, 2016.
3) Mizutani, D., Nakazato, Y. and Lee, J.: Network-level syn-

chronized pavement repair and work zone policies: Optimal solution and rule-based approximation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.120, 102797, 2020.

4) Lee, J. and Madanat, S.: A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.78, pp.106-122, 2015.

(2021. 10. 1. 受付**)**