

# 近接舗装区間の補修同期化の影響分析

中里 悠人<sup>1</sup>・水谷 大二郎<sup>2</sup>・奥村 誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 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 468-1)

E-mail: yuto.nakazato.s1@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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: mokmr@strep.main.jp

複数の連続した道路舗装区間の補修を考慮する場合、近接する舗装区間を同時に補修することで補修の固定費用（建設機材費用）を削減できる。そのため、単独で考慮した場合補修を必要としない舗装区間に対しても予防的な補修を行い、近隣舗装区間と同時に補修を行うことで、長期的に補修の固定費用削減が見込める。本研究では、予防的同時補修を考慮した道路舗装全体の最適補修施策を定式化する。その上で、予防的同時補修を考慮する必要性や、同時補修の効果が補修施策や道路舗装に与える影響について考察する。

**Key Words** : pavement asset management, life cycle cost, Markov decision process, repair synchronization

## 1. はじめに

道路舗装のように公共性が高く、社会的便益も維持費用も高い社会基盤施設に対しては、その社会的総余剰を最大化し維持管理を行うアセットマネジメントが必要となる。道路舗装のアセットマネジメントにおいては、道路を構成する舗装を 10m や 100m 単位の舗装区間に分割し、個々の舗装区間で劣化状況（劣化度）の把握や補修意思決定を行うのが一般的である。舗装区間の補修を行うには、当該舗装区間に交通規制をかけ、建設機材を用いて補修工事を行う必要がある。そこで、**図-1** のように近接する複数の舗装区間を同時に補修する場合、単一の建設機材で同時に補修することが可能であり、区間当たりの補修固定費用を削減できる。一方で**図-2** のように、劣化は進んでいるが単独ではまだ補修を必要としない舗装区間が存在するとき、近隣の要補修区間と同時に補修することで、次期以降当舗装区間で補修が必要になる可能性を低くし、長期的な補修固定費用を低くすることができる。このような予防補修を考慮した道路舗装全体の補修戦略を求めるには、全ての舗装区間における補修の有無を同時に決定する必要がある。さらに、劣化を考慮したライフサイクル費用 (LCC) 評価に基づく最適補修施策を求めるためには、道路舗装で出現しうる全ての劣化度の組み合わせに対する最適補修戦略を求める必要がある。

本研究では、予防的同時補修を考慮した舗装区間の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する。その上で、小規模な道路舗装システムで数値計算を行い、1) 同期化便益を考慮しなければ将来の LCC の

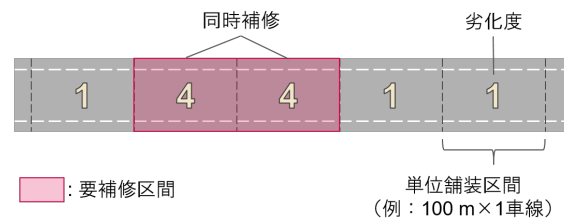


図-1 同時補修の例 (劣化度 4 で補修が必要)

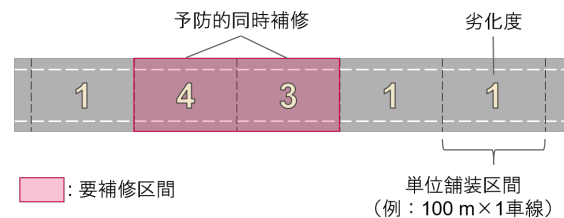


図-2 予防的同時補修の例 (劣化度 4 で補修が必要)

予測精度が低下してしまうことを指摘し、2) 同期化便益を考慮した複数区間の最適補修施策により単一区間の最適補修施策と比べ LCC を低減できることを示し、3) 複数区間の最適補修施策と道路舗装の劣化度推移の関係性に関する考察を行う。

以下、2. で本研究の基本的な考え方、3. で道路舗装の劣化状況の設定、4. で最適補修施策の定式化、5. で数値計算について説明する。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 補修同期化と最適補修施策

社会基盤施設の LCC の算出および最適補修施策決定を行う際には、個々の施設を独立に考えることが多い<sup>1)</sup>。しかし、道路舗装の補修においては、複数の要補修区間

が隣り合った時、それらを単一の連続規制区間内で単一の建設機材により同時に補修することで区間あたりの建設機材費用（以下、補修固定費用）を削減できる。実務においては、図-2のように近接する複数の舗装区間を同時に補修することで補修固定費用の削減を図るために、単一舗装区間の最適補修戦略では補修が必要ないとされる区間でも、予防的な補修をすることで近隣の要補修区間と同時に補修（補修同期化）を行う場合がある。

補修同期化を考慮した補修が現場で行われている以上、複数の舗装区間からなる舗装システムの LCC を、単一舗装区間の LCC の区間数倍で評価すると、LCC の将来予測精度が担保されない可能性がある。また、図-2のような補修の同期化が、管理者の経験的知見に基づいて実施されていることも珍しくなく、補修の同期化の正当性を科学的に評価する必要がある。

道路舗装全体に対する最適補修施策問題は、マルコフ決定過程（MDP）<sup>2)</sup>として定式化でき、全体の劣化状態ごとの補修戦略の集合となる。全体の劣化状態は各々の舗装の劣化状態の掛け合わせの数だけ存在するためその数は膨大であるため、計算コストが問題の規模の増大に伴い急激に拡大し、実務規模の MDP の解を求めるのは不可能である。そこで、本研究では小規模の道路舗装における最適補修施策を計算し、単一区間の最適補修施策（従来施策）とどのように異なるか考察する。

## (2) 既往研究

社会基盤施設のアセットマネジメントに関してはすでに多くの研究が行われており、劣化状態を離散的な状態変数で記述し、MDP を用いて最適補修施策を導出する研究は数多く存在する<sup>3)</sup>。しかし、多くの研究は単一の社会基盤施設のマネジメントを対象としており<sup>1)</sup>、複数の社会基盤施設間に存在する相互依存関係を考慮した研究は少ない。複数の社会基盤施設からなるシステムのマネジメントを対象としたほとんどの研究では、大規模な MDP の計算は不可能であるため、単一時刻におけるコストを最小とする補修戦略のみに着目している。織田澤等<sup>4)</sup>は、例外的に複数の異なる設備からなるシステムの補修同期化の効果に着目しているものの、最適補修戦略の候補を列挙できるような（あるいは、現実性を考慮しその候補数を削減できるような）状況を想定している。そのため、劣化パターンと戦略の組み合わせが膨大で、同期化が距離に依存するような道路舗装に対する最適補修施策では、当該研究での方法論を直接適用することは困難である。Burkhalter et al.<sup>5)</sup>は、補修の同期化ではなく、社会基盤施設のネットワーク特性を考慮した補修工事による利用者の不利益

の評価手法を提案しており、施設ごとのネットワーク特性を持つなどの点で本研究と異なる。Lethanh et al.<sup>6)</sup>や保田等<sup>7)</sup>は、ともに補修時点での費用を最小化することを目的として、前者は予算制約、後者は危険コストを考慮しているが、両者ともに、劣化過程の差異や補修同期化による長期費用の減少を考慮していない。このように、本研究で提案するような、道路舗装に対する最適補修施策およびその性質解明に関する研究は過去にない。

## (3) 道路舗装の劣化と補修

本研究は補修の同期化に焦点を当てるため、補修業務では考慮すべき 1) 点検費用、2) 利用者費用、3) 各舗装区間の劣化過程の異質性は考慮せず、同質の複数の舗装区間からなる道路舗装システムに対して、固定時間間隔で行われる補修工事の時間割引総費用を抑える補修施策の提案方法を対象とする。各舗装の劣化度は離散な指標で表し、舗装の劣化を離散マルコフ過程で記述して、舗装の劣化度が管理上設定された劣化度に達した場合には必ず補修を行う必要があると仮定する。

補修工法は切削オーバーレイなどを想定しているため、補修によって舗装の劣化度は完全に回復し新しいものと同じになる。補修工事を行う区間に対しては交通規制を行い、工事用の建設機材を用いて工事を行う必要がある。建設機材は連続した規制区間の間を自由に移動し、複数の舗装区間を同時に補修することができる。建設機材の費用削減によって補修同期化の便益が生み出される。

## 3. 複数道路舗装区間の劣化・補修過程

### (1) 時間軸の設定

複数の連続した道路舗装区間からなる道路舗装の劣化・補修過程をモデル化する。道路舗装システムが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。道路舗装システムに対しては、 $t_0$  から同じ時間間隔  $d$  で劣化度の点検を行い、その直後すぐに補修区間の決定と補修が行われる。 $i(i \in \mathbb{Z}^+)$  回目の点検補修時刻を  $t_i$  とし、点検補修時刻の集合  $\mathcal{T}$  を定義する：

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

$$\text{where } t_i = t_0 + id \quad (2)$$

### (2) システムの劣化度ベクトル

道路舗装システムは  $N(N = 2, 3, 4, \dots)$  個の連続かつ同質な舗装で構成されており、各舗装区間には 1 から  $N$  までの区間番号が振られている。 $n(n \in N)$  番目の舗装区間の劣化度は、 $M$  個の離散的なレーティングを表

す状態変数  $s_n$  を用いて表現する：

$$s_n = m \quad (3)$$

$$\text{where } n \in \mathcal{N} \quad (4)$$

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

$$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\} \quad (6)$$

$$\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

$\mathcal{N}$  は舗装区間番号の集合、 $\mathcal{M}$  は劣化度の状態空間である。ここでは、 $m$  が大きいほど劣化が進んでいることを表す。以上より、システム全体の劣化度を、 $n$  番目の要素が  $s_n$  の劣化度ベクトル  $s$  で定義する：

$$s \equiv [s_n] \quad (8)$$

劣化度ベクトルの状態空間  $\mathcal{S}$  は各区間の劣化度の直積で、 $\mathcal{S} = \mathcal{M}^N$  と表記できる。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  $s^-(t)$ 、補修直後の劣化度を  $s^+(t)$  と表す。

### (3) 劣化過程モデル

まず、単一の舗装区間の劣化過程をモデル化する。舗装の劣化は道路区間の交通量に関係せず、現在の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。 $i (i \in \mathbb{Z}^+)$  回目の点検補修時刻  $t_i$  から次の点検補修時刻  $t_{i+1}$  までに、劣化度が  $a (a \in \mathcal{M})$  から  $b (b \in \mathcal{M})$  に遷移する確率を  $p_{ab}$  とする：

$$p_{ab} = \text{Prob}[s_n^-(t_{i+1}) = b | s_n^+(t_i) = a] \quad (9)$$

$$\forall i \in \mathbb{Z}^+ \quad (10)$$

$$\forall a, b \in \mathcal{M} \quad (11)$$

自然劣化によって劣化度が小さくなる (=舗装の状態が良くなる) ことはあり得ないため、 $b > a$  の時、 $p_{ab} = 0$  が必ず成立する。 $p_{ab}$  を用いて、 $a$  行  $b$  列が  $p_{ab}$  の単一舗装区間の劣化度のマルコフ推移行列  $\mathbf{P}_{sing}$  を定義する：

$$\mathbf{P}_{sing} \equiv [p_{ab}] \quad (12)$$

$$\forall a, b \in \mathcal{M} \quad (13)$$

道路舗装システム全体では、 $i$  回目の補修後の劣化度ベクトルが特定の  $s^* \in \mathcal{S}$  の時、 $i+1$  回目の点検までに劣化度ベクトルが特定の  $s^{**} \in \mathcal{S}$  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：

$$\text{Prob}[s^-(t_{i+1}) = s^{**} | s^+(t_i) = s^*] \quad (14)$$

$$= \prod_{n \in \mathcal{N}} p_{s_n^* s_n^{**}} \quad (15)$$

### (4) 劣化・補修過程モデル

劣化した舗装に対して補修工事を行うことで劣化度が減少する (舗装状態が良くなる)。ここでは舗装に対する補修工法は、劣化度が最小の 1 になる取換工法 (e.g.

切削オーバーレイ) のみを考慮する。時刻  $t \in \mathcal{T}$  において、各区間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  $\delta(t)$  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：

$$s^+(t) = s^-(t) - [s^-(t) - \mathbf{1}] \circ \delta(t) \quad (16)$$

$$\text{where } \delta_n(t) \in \{0, 1\} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (17)$$

点検で劣化度が最大の  $M$  であった舗装区間に対しては必ず補修工事を行う必要がある。

## 4. 最適補修施策

### (1) 補修の前提条件

補修工事を行うためには、該当する舗装区間を通行止めにする必要がある。各区間に対して通行止めにするか否かを二値変数で表す規制ベクトルを  $\xi(t)$  とすると、

$$\delta_n(t) \leq \xi_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (18)$$

$$\text{where } \delta_n(t), \xi_n(t) \in \{0, 1\} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (19)$$

が成立する必要がある。以上の点を踏まえ、管理側は LCC が最小となるような補修ベクトルおよび規制ベクトルを決める必要がある。補修で発生する費用は、補修区間の数に比例する材料と人件費 (補修費用)  $h$ 、規制区間の数に比例する規制費用  $b$ 、建設機材の配置費用 (建設機材費用)  $k$  の三つからなる。建設機材は連続した規制区間の間を自由に移動し、一台で複数の補修を同時に行うことができる。以降補修ベクトル  $\delta(t)$  と規制ベクトル  $\xi(t)$  を合わせて規制・補修戦略と呼び、規制・補修戦略を決める方法を補修施策と呼ぶ。

### (2) 独立最適補修施策

舗装の同時補修による固定費用の削減を考慮せず、単一の舗装に対する最適補修施策をすべての舗装に対して適用する施策を、独立最適補修施策とする。単一の舗

装に対する最適補修施策は以下のように定式化される：

$$LCC = \min_{\delta, \xi} \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \delta(t) = 1 \quad \text{if } s^-(t) = M \quad (21)$$

$$\delta(t) \leq \xi(t) \quad (22)$$

$$\text{where } s(t_0) = 1 \quad (23)$$

$$\delta \equiv [\delta(t_1), \delta(t_2), \delta(t_3), \dots] \quad (24)$$

$$\xi \equiv [\xi(t_1), \xi(t_2), \xi(t_3), \dots] \quad (25)$$

$$\text{Prob}[s^-(t+1) = j | s^+(t) = i] \quad (26)$$

$$= p_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$$

$$h(t) = \alpha \delta(t) \quad (27)$$

$$b(t) = \beta \xi(t) \quad (28)$$

$$k(t) = \gamma \delta(t) \quad (29)$$

目的関数は LCC の最小化、制約条件はそれぞれ (1) 劣化度が最大だと補修が必要、(2) 補修には通行止めが必要、に対応している。α は補修区間あたりの材料・人件費の単価 (補修単価)、β は規制区間あたりの規制費用の単価 (規制単価)、γ は規制あたりの固定補修費用 (建設機材単価) である。

目的関数 (20) については、舗装システムの劣化が確率的であるため、最適な δ, ξ は一意ではない。このような状態の推移が確率的なモデルの最適化問題は MDP であり、システムの起こりうる任意の状態  $s^-(t) \in \mathcal{M}$  に対する規制・補修戦略の集合  $\{\delta(s), \xi(s) | \forall s \in \mathcal{M}\}$  が最適管理施策となる。

単一舗装の最適補修施策の目的関数 (20) において、補修費用も補修による劣化度の回復効果も、補修時のみ一定で発生し、補修は劣化度が最大の時のみ必要であるため、なるべく補修を遅らせる、「劣化度  $s^-$  が最大の  $M$  の時のみ規制・補修する」が最適補修施策になる：

$$\delta(s), \xi(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s = M \\ 0 & \text{if } s < M \end{cases} \quad (30)$$

単一舗装の最適補修施策を舗装全体に適用する (独立最適補修施策) 場合の最適規制・補修戦略は以下のようになる：

$$\delta_n(s), \xi_n(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s_n = M \\ 0 & \text{if } s_n < M \end{cases} \quad (31)$$

独立最適補修施策を適用した道路舗装の LCC は以下の

ようになる：

$$LCC = \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (32)$$

$$\text{s.t. } \delta_n(t), \xi_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } s_n^-(t) = M \\ 0 & \text{if } s_n^-(t) < M \end{cases} \quad (33)$$

$$\text{where } \text{Prob}[s_n^-(t+1) = j | s_n^+(t) = i] \quad (34)$$

$$= p_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$$

$$h(t) = \alpha \sum_{n \in \mathcal{N}} \delta_n(t) \quad (35)$$

$$b(t) = \beta \sum_{n \in \mathcal{N}} \xi_n(t) \quad (36)$$

$$k(t) = \gamma q(\delta(t)) \quad (37)$$

単一舗装の最適補修施策の LCC と異なり、建設機材費用  $k(t)$  は単純に補修区間の数に比例するのではなく、二つの要補修区間が偶然隣り合った場合、一単位の機械単価しか必要としない。そのため、独立最適補修施策の LCC は単一舗装の最適補修施策の区間数倍より小さくなる。

### (3) 予防補修を考慮しない最適補修施策 (ワークゾーン最適化)

単一舗装の最適補修施策では、劣化度が最大の区間のみ補修することに着目して、「劣化度最大の区間を要補修区間とし、規制費用と機械費用の合計を最小にする規制戦略を求める」が、予防補修を考慮しない施策 (ワークゾーン最適化) であり、以下のように定式化できる：

$$LCC = \min_{\Xi} \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (38)$$

$$\text{s.t. } \delta_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } s_n^-(t) = M \\ 0 & \text{if } s_n^-(t) < M \end{cases} \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (39)$$

$$\delta_n(t) \leq \xi_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (40)$$

$$\text{where } s(t_0) = \mathbf{1} \quad (41)$$

$$\Xi \equiv [\xi(t_1), \xi(t_2), \xi(t_3), \dots] \quad (42)$$

$$\text{Prob}[s_n^-(t+1) = j | s_n^+(t) = i] \quad (43)$$

$$= p_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$$

$$b(t) = \beta \sum_{n \in \mathcal{N}} \xi_n(t) \quad (44)$$

$$k(t) = \gamma q(\delta(t)) \quad (45)$$

建設機材は連続した規制内であれば複数の要補修区間を同時に補修できる。しかし、あまりにも離れている区間を同じ建設機材で補修させようとすると規制費用が多くなってしまう。最適ワークゾーンの効率的な



求め方は Lethanh<sup>6)</sup> が詳しいが、本研究では小規模な道路舗装を対象とするため、規制戦略  $\xi(t)$  を列挙することで最適ワークゾーンを求める。

#### (4) 予防補修を考慮した最適補修施策

道路舗装全体の LCC を最小にする、最適管理施策は、以下の最適化問題として定式化できる：

$$LCC = \min_{\Delta, \Xi} \sum_{t \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (46)$$

$$\text{s.t. } \delta_n(t) = 1 \quad \text{if } s_n^-(t) = M \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (47)$$

$$\delta_n(t) \leq \xi_n(t) \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (48)$$

$$\text{where } s(t_0) = \mathbf{1} \quad (49)$$

$$\Delta \equiv [\delta(t_1), \delta(t_2), \delta(t_3), \dots] \quad (50)$$

$$\Xi \equiv [\xi(t_1), \xi(t_2), \xi(t_3), \dots] \quad (51)$$

$$\text{Prob}[s_n^-(t+1) = j | s_n^+(t) = i] \quad (52)$$

$$= p_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$$

$$h(t) = \alpha \sum_{n \in \mathcal{N}} \delta_n(t) \quad (53)$$

$$b(t) = \beta \sum_{n \in \mathcal{N}} \xi_n(t) \quad (54)$$

$$k(t) = \gamma q(\delta(t)) \quad (55)$$

予防補修を考慮した最適補修施策では、一時点における費用だけでなく、長期的な LCC 評価に基づいて規制・補修戦略を求める必要があるため、他の施策に比べて計算コストが高い。

## 5. 数値計算事例

### (1) 数値計算事例の概要

数値計算事例では、宮崎ら<sup>8)</sup>で推定された、高速道路舗装（特性：IRI×高機能舗装×土工部×大型車交通量なし）のマルコフ推移確率を、7段階から4段階に縮小（健全度1・2を劣化度1に、健全度3・4を劣化度2に、健全度5・6を劣化度3に、健全度7を劣化度4にそれぞれ変換）したものを使用する。具体的なパラメータは表-1を参照されたい。

### (2) 補修施策ごとの LCC の比較

単一区間に最適補修施策を適用し、結果を6倍にしたものと、4章で定式化した3種類の補修施策について、LCC、一期あたりの平均補修区間数、一期あたりの平均規制区間数、一期あたりの機械使用数、機械毎の補修区間数をまとめた結果、表-2のようになった。

単一区間の最適補修施策を6倍にした場合のLCCと独立最適補修施策のLCCに差が生じていることから、単一舗装区間のものの補修区間数倍にするのでは道路

舗装全体のLCCを正確に評価できない可能性が示唆された。

最適補修施策は、ほかの施策と比べて平均補修区間数が多いが、平均機械使用数が少なく、LCCも小さくなっている。これは、最適補修施策では予防補修による同時補修が行われていることを示している。また、最適補修施策のLCCがワークゾーン最適化のみ行う施策のLCCより約15%低いことから、予防補修を考慮した最適補修施策が必要であることが示唆された。

### (3) 最適補修施策の特徴

最適補修施策では、劣化度が最大の4でない区間も、近接した区間で補修が行われていると予防補修が行われる。最適補修戦略  $\delta$  において、近接区間で補修が行われているとき、劣化度が2, 3の区間から最も近隣した補修区間との距離と、補修の有無をまとめると表-3になった。さらに、表-3から予防補修が行われる割合をまとめると、表-4になった。表-4から、劣化度が大きい区間ほど、また、最も近隣補修区間からの距離が近いほど、予防補修が行われる傾向が確認できる。

### (4) 劣化パスによる施策の変化

マルコフ推移行列を  $P$  から  $P^*$  に変えて、他のパラメータは同一の値を用いて、最適補修施策を計算した結果、予防補修が行われる割合は表-5になった。表-4と比較すると、補修の同期化が行われる割合が下がっている。この結果のみから劣化パターンが最適補修施策にどのような影響を与えるかを明確に考察するのは困難だが、劣化パターンによって最適補修施策が大きく変わることが示された。

## 6. おわりに

本研究では、補修の同期化を考慮した道路舗装の最適補修施策を定式化した。数値計算事例において、各種施策の比較を通して、最適補修施策の他の施策に対する優位性を示し、補修の同期化を考慮する必要性を示した。また、最適補修施策を構成する最適補修戦略を分析し、同期化補修の有無は劣化度や他の補修区間からの距離に大きく関係することを明らかにした。さらに、劣化過程が最適補修施策に大きく影響することを示し、最適補修施策の決定において劣化を考慮する必要性を示した。

最適補修戦略は、計算コストが規模の拡大に伴い急激に増えるため、小規模な道路舗装にしか適用できず、実務規模の道路舗装には適用できないという課題がある。今後は、本研究で解明した最適補修施策の特徴をもとに、大規模道路舗装でも最適(もしくはそれに近い)

表-1 数値計算パラメータ

|                         |        |         |         |          |
|-------------------------|--------|---------|---------|----------|
| 区間数: $N$                | 6      |         |         |          |
| 劣化段階: $M$               | 4      |         |         |          |
| 補修単価: $\alpha$          | 1      |         |         |          |
| 規制単価: $\beta$           | 1      |         |         |          |
| 建設機材単価: $\gamma$        | 5      |         |         |          |
| 計画期間: $T$               | 100    |         |         |          |
| シミュレーション回数              | 5,000  |         |         |          |
| 割引率: $\rho$             | 0.04   |         |         |          |
| マルコフ推移行列: $P$<br>交通量少   | 0.9163 | 0.06108 | 0.01678 | 0.005865 |
|                         | 0      | 0.5184  | 0.3004  | 0.1813   |
|                         | 0      | 0       | 0.4009  | 0.5991   |
|                         | 0      | 0       | 0       | 1        |
| マルコフ推移行列: $P^*$<br>交通量多 | 0.7837 | 0.1033  | 0.0597  | 0.0534   |
|                         | 0      | 0.1955  | 0.2728  | 0.5317   |
|                         | 0      | 0       | 0.1417  | 0.8583   |
|                         | 0      | 0       | 0       | 1        |

表-2 施策比較

| 施策        | 一区間最適補修施策を 6 倍 | 独立最適補修施策 | ワークゾーン最適化 | 最適補修施策  |
|-----------|----------------|----------|-----------|---------|
| LCC       | 68.5035        | 64.9167  | 62.0604   | 52.9444 |
| 平均補修区間数   | 0.4037         | 0.4036   | 0.4036    | 0.4365  |
| 平均規制区間数   | 0.4037         | 0.4036   | 0.4036    | 0.5817  |
| 平均機械使用数   | 0.4037         | 0.3806   | 0.341     | 0.2284  |
| 機械毎の補修区間数 | 1              | 1.0604   | 1.184     | 1.9111  |

表-3 他の区間で補修が行われている時の区間最適補修戦略

| 劣化度 | 最適補修戦略 | 最近隣補修区間からの距離 |     |    |    |   |
|-----|--------|--------------|-----|----|----|---|
|     |        | 1            | 2   | 3  | 4  | 5 |
| 2   | 補修しない  | 0            | 0   | 18 | 18 | 6 |
|     | 補修する   | 4180         | 404 | 60 | 0  | 0 |
| 3   | 補修しない  | 0            | 0   | 0  | 0  | 2 |
|     | 補修する   | 4188         | 408 | 74 | 14 | 0 |

表-4 最適施策で同期化補修が行われる戦略の割合

| 劣化度 | 最近隣補修区間からの距離 |      |      |      |    |
|-----|--------------|------|------|------|----|
|     | 1            | 2    | 3    | 4    | 5  |
| 2   | 100%         | 100% | 77%  | 0%   | 0% |
| 3   | 100%         | 100% | 100% | 100% | 0% |

表-5  $P^*$  の最適施策で同期化補修が行われる戦略の割合

| 劣化度 | 最近隣補修区間からの距離 |     |     |    |    |
|-----|--------------|-----|-----|----|----|
|     | 1            | 2   | 3   | 4  | 5  |
| 2   | 99%          | 77% | 0%  | 0% | 0% |
| 3   | 99%          | 85% | 45% | 0% | 0% |

参考文献

- 1) 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.
- 2) D. J. White.: *Markov Decision Processes*, Wiley, 1922.
- 3) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27, Issue 6, pp.425-438, 1993.
- 4) 織田澤利守, 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設の最適補修同期化政策, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.
- 5) 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*

施策を計算する方法を考える必要がある。

- Systems*, Vol.24, Issue 1, 2018.
- 6) Lethanh, N., Adey, B. T., and Burkhalter, M.: Determining an optimal set of work zones on large infrastructure networks in a GIS framework, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.24, Issue 1, 2018.
  - 7) 保田敬一, 川上順子, 若槻晃右, 兒玉崇, 甲元克明: 都市高速道路における大規模補修工事最適化支援システム, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.67, No.2, pp.I\_29-I\_43, 2011.
  - 8) 宮崎文平, 加藤寛之, 小濱健吾, 貝戸清之, 風戸崇之, 田中克則: 膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
- (2020. 3. 8. 受付)

## Analysis of Synchronized Repair for Road Pavement system

Yuto NAKAZATO, Daijiro MIZUTANI and Makoto OKUMURA

When determining sections to repair on a road network consists of multiple adjacent pavement sections, conducting repair work for neighboring sections simultaneously can reduce the fixed repair cost. Therefore, management for pavement network should take consider in conducting repair on sections don't need repair in single pavement section management. This study formulated optimal policy for pavement management considering synchronized repair and indicated the effectiveness to consider synchronized repair by numerical experiments.