

年次費用平準化を考慮した 社会基盤施設群の最適補修施策

福山峻一¹・水谷大二郎²・中里悠人³

¹非会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: shunichi.fukuyama.s5@dc.tohoku.ac.jp

²個人正会員 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非会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
E-mail: yuto.nakazato.s1@dc.tohoku.ac.jp

社会基盤施設を長期的に維持管理するにあたり、ライフサイクル費用を最小化するような補修施策が有効とされている。一方で、有限個の施設に対してこの施策を採用すると、劣化過程の不確実性に起因して各年次の補修費用が過度に変動し、予算や受注機会の確保が困難となる可能性がある。そこで本研究では、数十程度の規模の施設群に対して、確率過程により施設群の劣化過程をモデル化し、i) ライフサイクル費用、ii) 補修費用の変動、の重み付き和を最小化する最適補修施策の決定方法を提案する。さらに、同様の最適化問題において、厳密解の導出が困難である大規模施設群に対して、予防補修ルールを用いた近似解の導出方法を提案し、その有用性を分析する。

キーワード： 予算平準化、ライフサイクルコスト、最適化、動的計画法、アセットマネジメント

1. はじめに

アセットマネジメントの研究分野では社会基盤施設の適切な維持管理を目的とし、施設の期待ライフサイクル費用を最小とする補修施策を求めるための方法論が蓄積されてきた¹⁾²⁾³⁾。一方、現実有限個の社会基盤施設群を補修することを考えた場合、各年次の期待補修費用は経年的に変化しなくとも、劣化過程の不確実性に起因して、個々の施設に必要な補修タイミングにばらつきが生じ、各年次(個々の補修意思決定タイミング)における実際の補修費用に変動が生じることとなる。施設の補修を行う事業主体においては単年次ごとの予算がある程度決まっており、そのもとで補修を行っている。例として道路施設を考えた場合、路線や道路事務所、出張所それぞれの単位で予算が定められていると考えられる。したがって、実供用状況下の施設群においては、劣化過程に不確実性が介在するため、期待ライフサイクル費用最小化の観点から望ましい補修施策を採用した場合の補修費用と予算には相違が生じることとなる。補修費用と予算との過度な相違は、予算の確保に支障をきたすほか、確保された予算が非効率的に使用されることとなる。この場合、次期の予算が過小に見積もられる、必要な補修が予算内で実行できず劣化に起因したりリスクが増加するといった問題が生じる可能性がある。また、このような補修費

用と予算の過度な変動は、工事の実施件数の繁閑に大きな差を生む原因となってしまう。工事件数が不足する場合、工事従事者への処遇に悪影響を及ぼす一方、工事件数が増大する場合は、従事者の長時間労働や休暇取得に対する支障などの課題が生じることとなる。また、建設機材に関しても、特定の年次に工事が集中してしまう場合、機材の調達が困難になるなどの弊害が発生する可能性がある。以上の理由により、実務上では補修に必要な費用および資材、人材の年次的な平準化が求められており、ライフサイクル費用のみを最小化する最適補修施策が、実際には施設の維持補修の現場に適していないのが現状である。

予算の変動に着目した年次費用平準化に関する研究は、数は少ないものの過去には存在する。確定的な劣化過程を想定した基礎的な研究として、近田等⁴⁾は階段状に設定した健全度レベルの下で、遺伝的アルゴリズムによって補修アクションの適用タイミングをずらすことで平準化を行うモデルを提案している。また、Yoon et.al⁵⁾やYoon et.al⁶⁾はプロジェクトスケジューリングにおける資源平準化問題を応用し、最小モーメント法を用いて、計画期間内の補修アクションを前後させることによって道路舗装の補修費用を平準化するモデルを提案している。これらの研究では補修アクションの介入時間を変化させた場合に、先行・後続の補修アクションに与える影響を無視しており、長期的な補修

施策の有用性を議論できるものではない。さらに、経年的な社会基盤施設の劣化状態の変化を確定的なものとして与えているため、実在の施設で生じ得る劣化過程の不確実性を考慮することは難しい。

一方、不確実な劣化を考慮した平準化の研究として、Stephen et.al⁷⁾は、金融の分野における、Markowitz⁸⁾の平均ポートフォリオパフォーマンスとその分散の組み合わせの最小化を応用し、非線形な目的関数を定義することにより、施設の維持管理における支出と予算の乖離を最小限に抑える最適補修施策を求める手法を開発しており、不確実な劣化過程を有する単一施設において、経年的な支出であるライフサイクルコストを平準化している。しかし、施設群における維持補修を考える場合、複数の施設の不確実な劣化過程により年次の支出と予算の乖離が生じるため、筆者の知る限りでは、不確実な劣化過程を有する複数施設を考慮した年次費用平準化問題に関する研究は存在しない。

そこで本研究では、複数施設群におけるライフサイクル費用と期待単年次費用のばらつきを同時に抑えることを目的とする。施設群に対する補修施策を考える場合、補修の意思決定タイミングにおいて観測される施設群の状態ごとに補修アクションを決める必要がある。しかしながら、ここで考慮すべき状態数は A) 施設数と B) 個々の施設で定義する離散的な劣化段階に依存して決まり、大規模な施設群では考慮する状態数が膨大となってしまう。また、各状態ごとに取り得る補修アクションもさまざまであり、それらの組み合わせをさらに考慮すると、最適解を求めるための補修施策の解空間は膨大なものとなり最適化計算が不可能となる。そのような大規模な問題に対して、Mizutani et.al⁹⁾は、大規模な舗装ネットワークでの長期計画に沿った補修・舗装区間の最適解を、簡略化されたルールのもとで近似的に求める解法を提案した。ここでは、近似的な解法により厳密解に近い解を比較的計算コストを削減して求められること、解の形式が厳密解よりも簡単であり、意味解釈という面で実際の現場で適用しやすいという特徴がある。また、Smilowitz et.al¹⁰⁾では、維持補修における検査タイミングも最適解に含める Madanat¹¹⁾の計算手法をネットワークレベル拡張し、共通の制約の下での複数施設群のライフサイクル費用最小化の最適補修施策を含めている。Smilowitz et.al ではネットワークにおける施設群を集約化し、補修実施を割合で表すことにより、計算負荷を削減している。

以上の背景の下で、本研究では、数十程度の規模の施設群に対して、確率的に劣化する施設群の劣化・補修過程をモデル化し、i) ライフサイクル費用、ii) 補修費用の変動、の重み付き和を目的関数として、最適補修施策を決定する手法を提案する。この際、施設群の

状態を集約することで組合せ爆発を回避、さらに、同様の最適化問題において、厳密解の導出が困難である大規模施設群に対して、予防補修ルールを用いた近似解の導出方法を提案し、その有用性を分析する。以下、**2.**では社会基盤施設群に対する維持補修過程のモデル化を行い、**3.**で最適化及び近似解法を示す。**4.**では数値計算を実施し、**5.**でまとめを述べる。

2. 社会基盤施設群の劣化・補修過程

(1) 時間軸の設定

複数の同質な社会基盤施設から構成される社会基盤施設群の劣化・補修過程をモデル化する。カレンダー時刻 t_0 から始まる、無限に続く時間間隔が一律 d の離散時間軸 \mathcal{T} を定義する：

$$\mathcal{T} \equiv \{t_i | \forall i \in \mathcal{Z}, i \geq 0\} \quad (1)$$

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

各時点 $t_i \in \mathcal{T}$ で、全ての施設に対して一斉点検が行われ、それにより全ての施設の状態（健全度）が観測され、観測結果に基づいて各施設に対する補修工事の意思決定されるとする。補修に必要な時間は非常に小さいとして、補修の実施中に施設の劣化は発生しないとする。

(2) 社会基盤施設群の健全度ベクトル

本研究では、施設群に含まれる N 個の施設は全て同質（同じ機能、同じ工事費用、同じ劣化過程を有する）であると仮定する。単一施設の健全度 h は M 個の離散的なレーティングで表現できるとすると、健全度の状態空間 \mathcal{M} は $\mathcal{M} \equiv \{1, 2, \dots, M\}$ になる。任意の時点 $t_i \in \mathcal{T}$ における社会基盤施設群全体の状態は、各健全度をとる施設数を用いて、ベクトル \mathbf{n}_i で表現できる：

$$\mathbf{n}_i \equiv [n_{i,1}, \dots, n_{i,M}] \quad \forall i \in \mathcal{Z}^+ \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{m \in \mathcal{M}} n_{i,m} = N \quad (4)$$

健全度ベクトルの状態空間は \mathcal{N} とする。また、時刻 $t_i \in \mathcal{T}$ において、点検で観測した直後補修実施前の健全度ベクトルと、補修実施後の健全度ベクトルを区別するため、補修前の健全度ベクトルを \mathbf{n}_i^- 、補修直後の健全度ベクトルを \mathbf{n}_i^+ とする。

(3) 劣化過程

本研究では、個々の社会基盤施設の劣化過程は独立に、同じ斉時マルコフ過程を用いて記述できると仮定する。まず単一施設の劣化過程を記述する。時点 t_i で補修後の健全度が $h_i^+ = a$ 、時点 t_{i+1} で点検によって観測される健全度が $h_{i+1}^- = b$ になる確率、すなわち単一施

設のマルコフ推移確率 $\pi_{a,b}$ は以下のように表現される：

$$\pi_{a,b} = \pi[h_{i+1}^- = b | h_i^+ = a] \quad \forall i \in \mathcal{Z}, \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (5)$$

マルコフ推移確率については、以下の式が常に成立する。

$$0 \leq \pi_{a,b} \leq 1 \quad \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (6)$$

$$\pi_{a,b} = 0 \quad \text{if } a > b \quad \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (7)$$

$$\pi_{a,M} = 1 \quad \forall a \in \mathcal{M} \quad (8)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \pi_{a,m} = 1 \quad \forall a \in \mathcal{M} \quad (9)$$

式 (6) は推移確率が 0 以上 1 以下であること、式 (7) は健全度が自動で回復することがないこと、式 (8) は健全度 M は補修がない限り劣化過程の吸収状態であること、式 (9) は各健全度から他の健全度になる推移確率の合計が 1 であることを意味する。以上より、単一施設の劣化過程は、全ての $a, b (a \in \mathcal{M}, b \in \mathcal{M})$ の組み合わせによって表現されるマルコフ推移行列 Π で表現できる：

$$\Pi = \begin{pmatrix} \pi_{1,1} & \cdots & \pi_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{M,M} \end{pmatrix} \quad (10)$$

健全度は自動回復しないため、上記マルコフ推移行列は上三角行列になる。

施設群の健全度ベクトルの推移確率を表記するために、まず健全度ベクトルの変化量 \mathbf{x} を定義する。時点 $t_i \in \mathcal{T}$ で補修後の健全度ベクトルが \mathbf{n}_i^+ 、時点 t_{i+1} で点検によって観測される健全度ベクトルが \mathbf{n}_{i+1}^- であるとす。この時、以下の条件を満たす $\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ を、施設群の健全度ベクトルの変化量行列として定義する：

$$\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} \equiv \begin{pmatrix} x_{1,1}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} & \cdots & x_{1,M}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & x_{M,M}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{a,m}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} = n_{i+1}^+ \quad \forall a \in \mathcal{M} \quad (12)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} x_{m,b}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} = n_i^+ \quad \forall b \in \mathcal{M} \quad (13)$$

$x_{a,b}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ は、健全度ベクトルが \mathbf{n}_i^+ から \mathbf{n}_{i+1}^- に変化するとき、健全度が a から b に変化する施設の数意味する。施設の健全度は自動で回復することはないため、変化量行列はマルコフ推移行列と同様に上三角行列になる。同じ組み合わせの $(\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-)$ に対して、式 (11), (12), (13) を満たす変化量行列 $\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ は複数種類存在し、全ての可能な $\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ の集合を $\Omega^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ とする。

以上をもとに、施設群の健全度ベクトルのマルコフ推移確率 $p(\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-)$ を記述する。健全度ベクトルが \mathbf{n}_i^+ から \mathbf{n}_{i+1}^- になる確率は、全ての $\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} \in \Omega^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ の発生確率の合計である。特定の $\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}$ の発生確率 $\rho(\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-})$

は：

$$\rho(\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}) = \prod_{m \in \mathcal{M}} \left[\frac{n_{i+1}^-, m!}{\prod_{m' \in \mathcal{M}} x_{m,m'}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}!} \prod_{m'' \in \mathcal{M}} (\pi_{m,m''})^{x_{m,m''}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}} \right] \quad (14)$$

となり、それを集計した健全度ベクトルのマルコフ推移確率 $p(\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-)$ は

$$p(\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-) = \sum_{\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-} \in \Omega^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}} \rho(\mathbf{x}^{\mathbf{n}_i^+, \mathbf{n}_{i+1}^-}) \quad (15)$$

となる。

(4) 補修過程

時点 $t_i \in \mathcal{T}$ で点検直後の健全度ベクトルが \mathbf{n}_i^- に対して特定の補修施策 d を適用した場合の健全度ベクトルは \mathbf{n}_i^+ は、補修による健全度ベクトルの推移行列 $\mathbf{Q}^d(\mathbf{n}_i^-)$ を用いて計算できる：

$$\mathbf{n}_i^+ = \mathbf{n}_i^- \mathbf{Q}^d(\mathbf{n}_i^-) \quad (16)$$

$$\text{where } \mathbf{Q}^d(\mathbf{n}_i^-) = \begin{pmatrix} q_{1,1}^d(\mathbf{n}_i^-) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{I,1}^d(\mathbf{n}_i^-) & \cdots & q_{I,I}^d(\mathbf{n}_i^-) \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-) \leq 1 \quad \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (18)$$

$$q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-) = 0 \quad \text{if } a < b \quad \forall a, b \in \mathcal{M} \quad (19)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} q_{a,m}^d(\mathbf{n}_i^-) = 1 \quad \forall a \in \mathcal{M} \quad (20)$$

ここで、 $q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-)$ は、健全度 a の施設のうち、補修により健全度 b になる施設の割合を意味する。式 (18) は、 $q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-)$ は健全度の変化の割合であるため 0 以上 1 以下であること、式 (19) は、補修によって健全度が大きくなることはないこと、式 (20) は、 $q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-)$ は各健全度から他の健全度になる推移の割合の合計が 1 であることを意味する。なお、本研究では補修施策は時間 t_i によらず一定であり、補修推移行列 $\mathbf{Q}^d(\mathbf{n}_i^-)$ は健全度ベクトル \mathbf{n}_i^- によって一意に決定されるとする。

3. 年次費用平準化を考慮した補修施策

(1) 維持管理の前提条件

本研究では、健全度ごとに異なる工法が用いられ、かつ健全度ごとに 1 種類の工法のみを考慮すると仮定する。すなわち本研究で考慮する施策 d については、以下の条件が必ず成立する。

$$q_{a,b}^d(\mathbf{n}_i^-) \in \{0, 1\} \quad \forall a, b \in \mathcal{M}, \forall \mathbf{n}_i^- \in \mathcal{N} \quad (21)$$

また、健全度が最大の M であると施設に対しては必ず工事を行う必要があり、その際行われる工事により健

全度が最小の1になると仮定する。すなわち

$$q_{M,m}^d(\mathbf{n}_i^-) = \begin{cases} 1 & \text{if } m = 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \forall m \in \mathcal{M}, \forall \mathbf{n}_i^- \in \mathcal{N} \quad (22)$$

が任意の施策 d について成立する必要がある。

(2) 単年次期待費用と単年次費用分散

任意の施策 d を適用した際の、健全度ベクトルの定常生起確率を定式化する。まず、劣化による健全度ベクトルの生起確率の推移を定式化する。健全度ベクトルの状態空間 \mathcal{N} に含まれる全ての健全度ベクトル \mathbf{n} に1から S までの番号をつける、すなわち $\mathcal{N} = \{\mathbf{n}^1, \mathbf{n}^2, \dots, \mathbf{n}^S\}$ とすると、劣化による健全度ベクトルの生起確率の推移確率行列 $\tilde{\mathbf{P}}$ が定義できる：

$$\tilde{\mathbf{P}} \equiv \begin{pmatrix} p(\mathbf{n}^1, \mathbf{n}^1) & \cdots & p(\mathbf{n}^1, \mathbf{n}^S) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p(\mathbf{n}^S, \mathbf{n}^1) & \cdots & p(\mathbf{n}^S, \mathbf{n}^S) \end{pmatrix} \quad (23)$$

同様に、補修施策 d を適用した場合、補修による健全度ベクトルの生起確率の推移行列 $\tilde{\mathbf{Q}}^d$ が定義できる：

$$\tilde{\mathbf{Q}}^d \equiv \begin{pmatrix} \tilde{q}^d(\mathbf{n}^1, \mathbf{n}^1) & \cdots & \tilde{q}^d(\mathbf{n}^1, \mathbf{n}^S) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{q}^d(\mathbf{n}^S, \mathbf{n}^1) & \cdots & \tilde{q}^d(\mathbf{n}^S, \mathbf{n}^S) \end{pmatrix} \quad (24)$$

where $\tilde{q}^d(\mathbf{n}^s, \mathbf{n}^{s'})$

$$= \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{n}^{s'} = \mathbf{n}^s \mathbf{Q}^d(\mathbf{n}^s) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \forall s \in \{1, 2, \dots, S\} \quad (25)$$

劣化による推移確率行列 $\tilde{\mathbf{P}}$ と、補修による推移行列 $\tilde{\mathbf{Q}}^d$ を用いて、時点 t_i における健全度ベクトルの生起確率ベクトル μ_i^d を定義することができる：

$$\mu_{i+1}^d = \mu_i^d \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{Q}}^d \quad \forall i \in \mathcal{Z}^+ \quad (26)$$

$$\text{where } \mu_{i+1}^d = (\tilde{\mu}_{i,1}^d, \tilde{\mu}_{i,2}^d, \dots, \tilde{\mu}_{i,S}^d) \quad (27)$$

ここで、 $\tilde{\mu}_{i,s}^d$ は時点 t_i において、点検により健全度ベクトル \mathbf{n}^s が観測される確率である。時間を無限に近づけた場合 ($i \rightarrow \infty$)、健全度ベクトルの定常生起確率 $\tilde{\mu}^d$ が得られる：

$$\tilde{\mu}^d = \tilde{\mu}^d \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{Q}}^d \quad (28)$$

施策 d を適用することで、健全度ベクトル \mathbf{n}^s 時の施設群に対して補修を行うことで発生する費用を C_s^d とすると、単年次期待費用 E_d 、単年次費用分散 V_d は以下のように計算できる：

$$E_d = \sum_{s \in \{1, 2, \dots, S\}} C_s^d \tilde{\mu}_s^d \quad (29)$$

$$V_d = \sum_{s \in \{1, 2, \dots, S\}} (C_s^d - E_d)^2 \tilde{\mu}_s^d \quad (30)$$

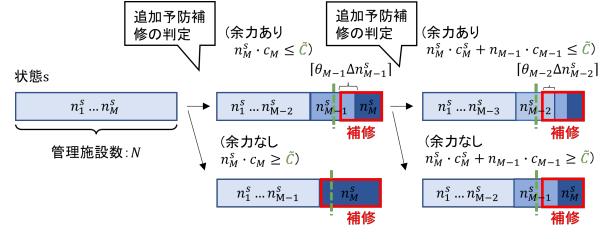


図-1: 予防補修ルール概念図

(3) 最適補修施策

施設群の管理者は、単年次期待費用 E_d と単年次費用分散 V_d の重み付き和を最小化するのが目的である。よって、最適補修施策 d^* は以下のように定義される：

$$\min_d \sum_{t_i \in \mathcal{T}} \frac{1}{(1 + \gamma)^{t_i}} \{ (1 - \varepsilon) C_s^d + \varepsilon (C_s^d - E_d)^2 | \mathbf{n}^0 = \mathbf{n}^s \} \quad \forall \mathbf{n}^s \in \mathcal{N} \quad (31)$$

最適補修施策を求める問題はマルコフ決定過程であり、補修による健全度の推移は時間に依存せず、状態に依存するため、以下が常に成り立つ：

$$q_{a,b}^{d^*}(\mathbf{n}_i^-) = q_{a,b}^{d^*}(\mathbf{n}^s) \quad \forall a, b \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{Z}^+, \forall \mathbf{n}^s \in \mathcal{S} \quad (32)$$

ここで、 $\varepsilon = 0$ の時の最適補修施策は、費用分散を考慮しない LCC 最小化を目的とする最適補修施策問題となる。

また、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解くことが可能であるが、出現する状態の数 S が大きくなるにつれ、計算が困難になり、実用レベルの問題に対して最適補修施策の計算は困難である。

(4) 予防補修ルールを用いた近似的補修施策

最適補修施策の計算は困難であるため、本研究では最適補修施策に近い施策を計算する方法として、以下の予防補修ルールを用いた近似的補修施策を提案する。状態を複数のグループに分割する。グループごとに操作変数 $(\phi, \theta_{(M-1)}, \dots, \theta_2)$ を設定し、図-1 のルールを用いて状態ごとの補修施策を決定する。単年次に許容できる補修費用の上限値を \tilde{C} とする。 \tilde{C} は、期待ライフサイクル費用最小化となる $d^*(\varepsilon) = d^*(0)$ を実施した際の定常状態での施設群の状態の生起確率ベクトル $\tilde{\mathbf{v}} = (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_S)$ 、操作変数 ϕ を用いて以下のように設

定する：

$$\tilde{C} = \phi \sum_{s \in \{1, 2, \dots, S\}} C_s^{d^*(0)} \tilde{v}_s \quad (33)$$

健全度 m に対する補修単価を c_m とし、 t_i 期において観測された健全度 M の施設数 $n_{\{i, M\}}$ の施設をすべて補修する際の費用 $n_{\{i, M\}} c_M$ が上限値 \tilde{C} を下回る、すなわち補修可能な施設数にまだ余力がある場合、追加で健全度 $M-1, \dots, 2$ の施設もある程度補修するものとする。具体的には、図-4で余力あり ($n_M^s c_M \leq \tilde{C}$) と判断されるようなある t 期の状態において、余剰予算 $\Delta \tilde{C}_{M-1}$ で補修できる健全度 $M-1$ の施設の $100\theta_{M-1}$ ($0 \leq \theta_{(M-1)} \leq 1$) パーセントを予防補修する。これを、健全度 $m = M-1, \dots, 2$ と繰り返し、予防補修を行う施設を決定する。各値の算出式は以下に示す。なお、 $\lceil \alpha \rceil$ は、実数 α に対して α 以上の最小の整数を返す天井関数である。

$$\Delta \tilde{C}_m = \tilde{C} - \sum_{a=0}^{M-m-1} \tilde{n}_{M-a}^s c_{M-a} \quad (2 \leq m \leq M-1) \quad (34)$$

$$\Delta n_m^s = \frac{\Delta \tilde{C}_m}{c_m} \quad (2 \leq m \leq M-1) \quad (35)$$

$$\tilde{n}_m^s = \lceil \theta_m \Delta n_m^s \rceil \quad (2 \leq m \leq M-1) \quad (36)$$

以上の計算を個々のグループに対して行うことで補修施策が決定される。また、その補修施策を用いた際の単年次期待費用と単年次費用分散がパレート解となるような操作変数 $\phi, \theta_{M-1}, \dots, \theta_2$ の集合を予防補修ルールにおける解集合とする。

4. 数値計算

(1) 小規模な施設数における数値計算例

政策反復法によって最適補修施策の厳密解の算出が可能である小規模な施設数について、予防補修ルールによる近似解と、厳密解との比較を行う。

施設数を $N = 20$ とし、劣化状態の表現、補修工法およびマルコフ推移確率行列 Π はそれぞれ表-1と表-2に示した。予防補修ルールは、全てのグルーピングパターンから最適なパターンを選定したうえで、健全度ベクトルの状態空間を2つのグループに分割して補修施策の作成を行った。グルーピングにおける条件式、およびとりうるパラメータの範囲は表-3に示した。

図-4には $N = 20$ における最適補修施策の厳密解と近似解それぞれにおける単年次期待費用と単年次費用分散を示している。予防補修ルールでは、計算期間3,000年、反復回数10,000回のシミュレーションを用いて単年次期待費用と単年次費用分散を算出し、パレート解を導出した。

数値計算によって、厳密解では単年次期待費用と単年次費用分散のトレードオフ関係を示すパレートフロンティアが図-4のように得られた。この結果は、追加的

な費用の投入により平準化が実現されることを表しているが、単年次費用分散を過度に制約することが費用低減を阻害してしまう可能性も示唆している。また、パレートフロンティア両端の費用最小解と分散最小解における最適補修施策を比較すると、費用最小解では最悪な健全度に対する確定補修のみが採用され、そのほかの健全度に対しての補修は見られなかった。この場合、最適補修施策は各健全度ベクトルに対して一律な、表-3のような施策となる。これは、 $\varepsilon = 0$ の費用最小解では、単一施設ごとにLCC最小となる最適補修施策が適用されており、本研究では施設群を同質なものととらえているため、最適補修施策が均一になったと言える。次に、分散最小解における最適補修施策を見ると、多くの健全度ベクトルにおいて費用最小解と同様の、健全度4のみを補修する補修施策が見られたが、いくつかの健全度ベクトルにおいては異なる補修が適用されていた。そこで、実施される補修が費用最小解とは異なる状態のみを取り出して分析した。対象とする健全度ベクトル n^s における、健全度ごとの施設数 n_m^s と、最適補修施策によって補修される施設数 $\Delta n_m^s(d^*)$ 、補修の際の補修費用 C_s^d は付表.1にまとめた。この時、施設数20、健全度4段階を想定した場合の健全度ベクトルの組み合わせは1,771通りであり、そのうち費用最小解と分散最小解で補修施策が異なっていたものは630通りあった。対象の健全度ベクトルにおける補修施策を分析すると、それらの中では健全度4の施設数 $n_{s,4}$ が0~4と全施設数20に対して少なく、分析対象外の状態では見られなかった健全度3もしくは健全度2に対する補修が行われていることがわかった。その際、補修費用は1,900~3,400(千円)の範囲で発生しており、健全度ベクトルごとで補修費用に一定の範囲で上限値が設定されていることが見て取れた。これは、ある一定の費用水準を定めて、健全度4に対する確定補修の補修費用が費用水準を下回った場合に、必ずしも補修が必要とはなっていない施設に対しても予防的に補修を行うというもので、予防補修ルールと近い補修施策であると言える。確認のため $\varepsilon = 10^{-4}$ においても同様の比較を行ったところ、補修施策が費用最小解と異なっていたものは288通りあり、その際の補修費用水準は300~2,000(千円)の範囲であった。この際の分析対象の健全度ベクトルにおける $n_M^s, \Delta n_m^s(d^*), C_s^d$ も付表.2にまとめた。 $\varepsilon = 10^{-4}$ の場合では、対象となる健全度ベクトルの数や補修費用の上限値が、分散最小解の場合と比べて小さくなっていることがわかる。したがって分散が抑制されるような補修施策では、いくつかの健全度ベクトルに対して予防補修と同様の補修施策が設定され、また、分散を小さくしていくにつれ、予防的な補修が実施される健全度ベクトルの数、およびその

表-1: 補修による健全度の変化と補修費用

健全度	回復水準	補修単価 (千円)
1	-	-
2	2 → 1	300
3	3 → 2	400
4	4 → 1	1,000

表-2: マルコフ推移確率行列 II

健全度	1	2	3	4
1	0.6922	0.2634	0.0408	0.0036
2	0	0.7339	0.2291	0.0370
3	0	0	0.7815	0.2185
4	0	0	0	1

表-3: 予防補修のグルーピング条件とパラメータ ($N = 20$)

グループ 1	条件式	$\sum_{m \in M} n_m^s c_m > \tilde{C}$	θ_2	θ_3	φ	0, 0.7, 0.8, ..., 1.3
グループ 2		$\sum_{m \in M} n_m^s c_m \leq \tilde{C}$	θ_2	$0, \frac{1}{8}, \frac{2}{8}, \dots, 1$		

際の補修費用の上限値が大きくなることが分かった。

予防補修ルールによる解を見てみると図-4では、予防補修ルールによってパレートフロンティア近傍の近似解が得られていることがわかる。これは、一律に設定する単純な予防補修のルールにおいても、分散を抑制させる補修施策の導出が可能であることを示している。しかしながら、予防補修ルールによる近似解は、単年次費用分散が一定値よりも小さいものとなると、パレートフロンティア上から乖離した値を示すようになった。また、パレートフロンティアにおける分散最小解と同値の補修施策も得ることができていなかった。先に述べたように、厳密解において分散を抑制する補修施策は、一定の範囲において状態ごとに補修費用が変動している。そのため、近似解をより厳密解に近づける場合には、予防補修ルールを用いて同様の補修費用の変動を再現する必要がある、より細かいグルーピングとパラメータの設定が必要となる。しかし、パレートフロンティアに近い解を得るためのグルーピングとパラメータの詳細な設定は、解空間を膨大にさせると共に、作成される補修施策を複雑なものにしてしまうため、予防補修ルールの目的に反すると言える。

次に、予防補修によって生じる単年次費用の特徴を分析するため、初期の状態を $n^0 = (20, 0, 0, 0)$ とし、計算期間 10,000 年とした確率過程のシミュレーションを行い、単年次費用に対するヒストグラムの作成を行った。予防補修を行わない場合と、予防補修ルールを適用する場合の補修施策において、シミュレーションによって発生した単年次費用のヒストグラムを作成した。図-2は予防補修をせず、健全度4に対する確定的な補修のみを行うとしたときの、単年次費用のヒストグラムであり、図-3は予防補修ルールによる補修施策のヒ

ストグラムである。予防補修ルールのパラメータは、グループ1は $\varphi = 1.1, \theta_2 = \theta_3 = 1.0$ 、グループ2は $\varphi = 1.1, \theta_2 = 1.0, \theta_3 = 0.5$ とし、補修費用の上限値は $\tilde{C} = 2,107$ であった。図-2、図-3より、予防補修ルールの適用によって、単年次の費用のばらつきがおさえられ、 $\tilde{C} = 2107$ (千円)の周辺に単年次の補修費用が集中していることがヒストグラムから確認できる。予防補修ルールを適用する場合、単年次に発生する費用は大まかに3つのグループに分けられる。1つ目は施設の大半が健全度1となる場合である。ここでは補修対象となる施設が少数であるため、予防補修を実施したとしても単年次費用は \tilde{C} よりも小さくなる。グループ1の補修費用が計算期間内に多く発生する場合、ヒストグラムは左側に膨らむこととなるが、マルコフ推移確率 II による劣化を考慮する場合、 $N = 20$ では、首期において大半の施設が健全度1のままである確率は限りなく低いため、グループ1は供用開始時点を除いてほとんど発生することはない。2つ目は、予防補修の実施によって健全度2もしくは3の施設が追加補修され、 \tilde{C} を超えない程度の単年次費用が発生している場合である。予防補修は健全度4に対する補修費用が \tilde{C} よりも低い際に実施されるため、これにより単年次費用が \tilde{C} を過度に下回ることを防ぎ、ヒストグラム左側へのふくらみを抑制していると考えられる。3つ目は、健全度4の施設数が多く、補修によって \tilde{C} よりも大きな単年次費用が生じる場合である。グループ3の補修費用が多く発生する場合、ヒストグラムは右側に膨らむこととなるが、図-3にそのような特徴は見られなかった。これは、追加予防補修によって一部の健全度2,3の施設の健全度が1つ回復することによって、次時点において健全度4の施設が発生する確率が小さくなるため、

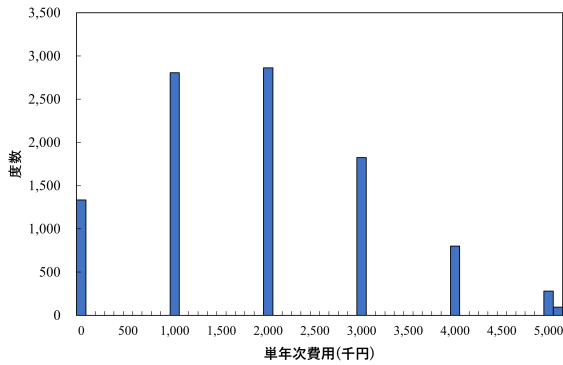


図-2: 予防補修なしの単年次費用のヒストグラム

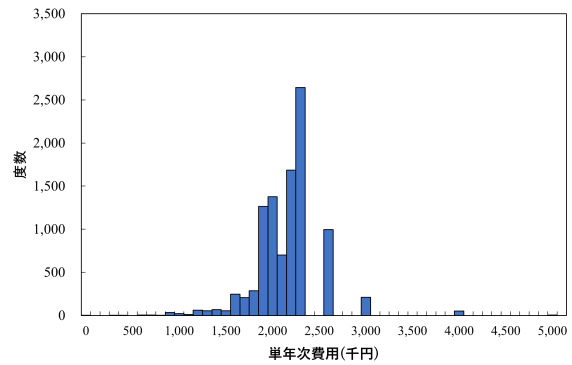


図-3: 予防補修ありの単年次費用のヒストグラム

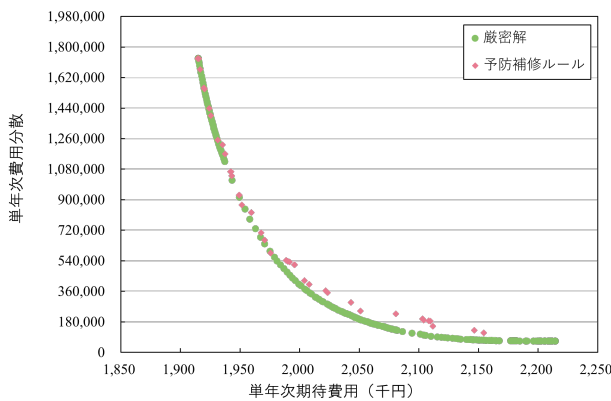


図-4: 厳密解 vs. 予防補修ルール ($N = 20$)

結果として計画期間を通して健全度4の施設が発生することを抑制しているためであると考えられる。以上の理由から、予防補修は、単年次補修費用が過度に小さくなることを防ぎつつ、過度に大きくなることも防ぐ効果があるため、結果的に発生する費用のばらつきを抑えるために有用であると言える。

(2) 大規模な施設数における数値計算例

施設数が大規模で、政策反復法による厳密解の算出が困難な場合における補修施策を、予防補修ルールを用いて作成する。施設数を $N = 100$ とし、健全度表現、補修工法およびマルコフ推移確率行列 $\mathbf{\Pi}$ は前節で用いたものと同様とした。また、グルーピングにおける条件式、およびパラメータの範囲は表-5に示した。単年次期待費用と単年次費用分散の計算に用いるシミュレーションは、初期の健全度ベクトルを $n^0 = (100, 0, 0, 0)$ とし、 $N = 20$ の場合と同様に、計算期間 3,000 年の確率過程における補修費用の平均値と分散を計算し、10,000 回のシミュレーションにおける平均値を単年次期待費用と単年次費用分散とした。 $N = 100$ では解空間が膨大となり厳密解の計算ができないため、施設数を 5 施設

表-4: $\varepsilon = 0$ における最適補修施策

健全度	回復水準	補修単価 (1000 円)
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	4 → 1	1,000

1 単位に集計化し、 $N = 20$ で算出した最適補修施策を適用することによって施設の集計化による近似解を算出した。この際、近似解を用いて式 (30) より算出される単年次費用分散は、集計化による標本分散となるため、予防補修ルールとの比較に用いるために母分散の算出が必要となる。したがって、最適補修施策の厳密解を算出した施設数を N_a 、補修施策を適用する施設数を N_b とすると、単年次期待費用と単年次費用の母分散は式 (37),(38) を用いて以下のようになる。

$$E'_d = \sum_s C_s^d \tilde{\mu}_s^d \cdot \frac{N_b}{N_a} \quad (37)$$

$$V'_d = \sum_s (C_s^d - E_d)^2 \tilde{\mu}_s^d \cdot \frac{N_b}{N_a} \quad (38)$$

予防補修ルールによる補修施策のうち、単年次期待費用と単年次費用分散がパレート解となるものと、式 (37),(38) を用いて算出した、 $N = 100$ に対する施設集計化による単年次期待費用と単年次費用分散の近似解を、どちらも図-5に示した。 $N = 100$ の場合、予防補修ルールによって得られたパレート解の多くが、施設集計化の近似解によるパレートフロンティアよりも優れた値となっていることがわかる。これは、健全度2,3が追加補修の対象となるような健全度ベクトルに対して、施設集計化による近似解では5施設ずつしか追加補修

表-5: 予防補修のグルーピング条件とパラメータ ($N = 100$)

グループ 1	条件式	$\sum_{m \in \mathcal{M}} n_m^s c_m > \tilde{C}$	θ_2	0, 1	φ	0, 0.7, \dots, 1.2
グループ 2			θ_3			
	$\sum_{m \in \mathcal{M}} n_m^s c_m \leq \tilde{C}$	θ_2	0, $\frac{18}{32}, \frac{19}{32}, \dots, 1$			
		θ_3	0, $\frac{10}{24}, \frac{11}{24}, \dots, 1$			

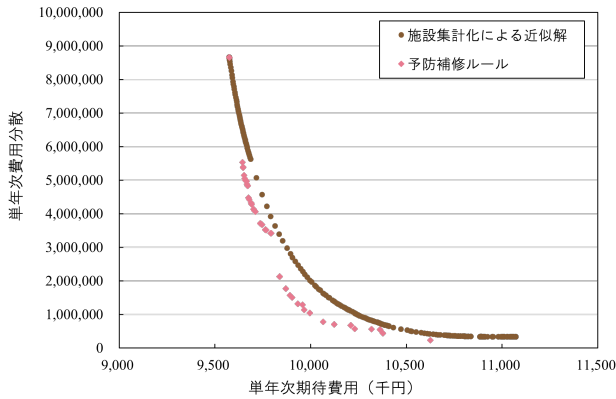


図-5: 施設集計化による近似解 vs. 予防補修ルール ($N = 100$)

施設数を制御できないことが原因である。一方、予防補修ルールでは、パラメータの設定によって細かい予防補修の実施施設数が設定できるため、施設集計化による近似解よりも優れた解を得ることができたと言える。当然、 $N = 100$ に対して政策反復法による最適解の算出を行えば、予防補修ルールよりも優れた解を得ることはできるが、状態空間に起因した問題上、大規模な施設数では計算が不可能であるため、このように大規模な施設数に対して本研究で提案した予防補修ルールが有効であると言える。

5. おわりに

本研究では、複数の社会基盤施設群に対して、期待ライフサイクル費用最小化の補修施策を実施する際に、劣化の不確実性に起因して、単年次に生じる費用がばらつくことに着目し、単年次において生じる補修費用を抑えつつ、その変動も小さくするような補修施策の提案を目的とした。その際、施設群全体を考慮した健全度ベクトルを新たに定義し、そのもとで健全度ベクトル間の推移確率の定式化や、ライフサイクル費用と補修費用の変動の双方を目的関数に加えた重み付き最適化を定式化した。また、少数の施設数において最適補修施策の厳密解を算出することによって、単年次期待費用と単年次費用分散の間のトレードオフ関係を明らかにした。次に、分散の抑制に有用となるような施設群の補修方法に着目し、状態空間が膨大で、最適化が

困難となる大規模な施設数に対して、ある期で必要となる補修費用が事前に定めた費用水準を下回った場合、当該期で必ずしも補修が必要とはなっていない施設に対しても予防的に補修を行うような予防補修ルールを提案した。予防補修ルールでは、小規模な施設数に対しては最適解近傍の近似解を得ることができ、大規模な施設数では、政策反復法を用いた施設集計化による近似解よりも優れた解を得ることができた。

本研究の課題として、健全度ベクトルの組み合わせ数に起因する推移確率の計算時間の増大が、大規模な施設数での最適補修施策の厳密解の算出を困難にしたことがあげられる。実用性を考慮した場合、最適化に用いる施設数はより大規模なものを想定する必要がある、それに伴って健全度ベクトルの組み合わせも増加することとなる。また、本研究ではすべての施設が同質な確率劣化を行うものとして扱っているが、それらが同質でない施設を含む施設群を考える場合、考慮すべき健全度ベクトルの組み合わせは施設数が同じであってもより多くなってしまい、推移確率の算出がより困難になる。したがって、より実用的な場面を想定した補修施策を提案するためには、健全度ベクトル間の推移確率の算出過程を効率化するような計算手法や近似的解法の開発を行うことが必要であるといえる。また、本研究では複数の施設を同時に補修する際の補修費用の相関関係や便益、単年次費用のばらつきを抑えることによって生じる便益などを定量化していない。したがって重み付きパラメータがそれらの情報を内包しているものとして最適補修施策が選択されることとなる。しかし、重み付きパラメータの値は意思決定者にとっては不明瞭であり、実際には同時補修による便益や平準化による便益などを考慮して補修施策は決定されるものであるため、それらの定量化が今後必要となる。

付録

3.(1)における分散最小解と $\varepsilon = 1.0 \cdot 10^{-4}$ での最適解のそれぞれについて、 $\varepsilon = 0$ の最適解との比較を行い、適用される補修施策が異なる健全度ベクトルのみを抜き出し、その健全度ベクトルごとの施設数 n_m^s 、最適補修施策によって補修される施設数 $\Delta n_m^s(d^*)$ 、補修の際の補修費用 C_s^d を付表-1、付表-2にまとめた。

n_m^s	$\Delta n_m^s(d^r)$	C_s^d	n_m^s	$\Delta n_m^s(d^r)$	C_s^d	n_m^s	$\Delta n_m^s(d^r)$	C_s^d	n_m^s	$\Delta n_m^s(d^r)$	C_s^d
(5,14,1,0)	(0,6,1,0)	2200	(7,12,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(10,2,8,0)	(0,1,5,0)	2300	(13,2,5,0)	(0,2,4,0)	2200
(5,15,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(7,12,1,0)	(0,6,1,0)	2200	(10,3,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(13,3,2,2)	(0,1,0,2)	2300
(6,0,12,2)	(0,0,2,2)	2800	(7,13,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(10,3,6,1)	(0,0,3,1)	2200	(13,3,3,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,0,13,1)	(0,0,4,1)	2600	(8,0,10,2)	(0,0,2,2)	2800	(10,3,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(13,3,4,0)	(0,2,4,0)	2200
(6,0,14,0)	(0,0,7,0)	2800	(8,0,11,1)	(0,0,4,1)	2600	(10,4,4,2)	(0,1,0,2)	2300	(13,4,2,1)	(0,1,2,1)	2100
(6,1,11,2)	(0,0,2,2)	2800	(8,0,12,0)	(0,0,6,0)	2400	(10,4,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(13,4,3,0)	(0,3,3,0)	2100
(6,1,12,1)	(0,0,4,1)	2600	(8,1,9,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,4,6,0)	(0,1,5,0)	2300	(13,5,1,1)	(0,2,1,1)	2000
(6,1,13,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,1,10,1)	(0,0,4,1)	2600	(10,5,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(13,5,2,0)	(0,4,2,0)	2000
(6,2,10,2)	(0,0,2,2)	2800	(8,1,11,0)	(0,0,6,0)	2400	(10,5,4,1)	(0,0,3,1)	2200	(13,6,0,1)	(0,3,0,1)	1900
(6,2,11,1)	(0,0,4,1)	2600	(8,2,8,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,5,5,0)	(0,2,4,0)	2200	(13,6,1,0)	(0,5,1,0)	1900
(6,2,12,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,2,9,1)	(0,0,4,1)	2600	(10,6,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(13,7,0,0)	(0,6,0,0)	1800
(6,3,9,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,2,10,0)	(0,0,6,0)	2400	(10,6,3,1)	(0,0,3,1)	2200	(14,0,4,2)	(0,0,1,2)	2400
(6,3,10,1)	(0,0,4,1)	2600	(8,3,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,6,4,0)	(0,2,4,0)	2200	(14,0,5,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,3,11,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,3,8,1)	(0,1,3,1)	2500	(10,7,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(14,0,6,0)	(0,0,5,0)	2000
(6,4,8,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,3,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(10,7,2,1)	(0,1,2,1)	2100	(14,1,3,2)	(0,1,0,2)	2300
(6,4,9,1)	(0,0,4,1)	2600	(8,4,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,7,3,0)	(0,3,3,0)	2100	(14,1,4,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,4,10,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,4,7,1)	(0,0,3,1)	2200	(10,8,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(14,1,5,0)	(0,0,5,0)	2000
(6,5,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,4,8,0)	(0,0,6,0)	2400	(10,8,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(14,2,3,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,5,8,1)	(0,1,3,1)	2500	(8,5,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,8,2,0)	(0,6,1,0)	2200	(14,2,4,0)	(0,2,4,0)	2200
(6,5,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,5,6,1)	(0,0,3,1)	2200	(10,9,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(14,3,2,1)	(0,1,2,1)	2100
(6,6,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,5,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(10,9,1,0)	(0,7,0,0)	2100	(14,3,3,0)	(0,3,3,0)	2100
(6,6,7,1)	(0,1,3,1)	2500	(8,6,4,2)	(0,0,1,2)	2400	(10,10,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(14,4,1,1)	(0,2,1,1)	2000
(6,6,8,0)	(0,0,6,0)	2400	(8,6,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(11,0,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(14,4,2,0)	(0,4,2,0)	2000
(6,7,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,6,6,0)	(0,1,5,0)	2300	(11,0,8,1)	(0,0,3,1)	2200	(14,5,0,1)	(0,3,0,1)	1900
(6,7,6,1)	(0,2,2,1)	2400	(8,7,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(11,0,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(14,5,1,0)	(0,5,1,0)	1900
(6,7,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(8,7,4,1)	(0,0,3,1)	2200	(11,1,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(14,6,0,0)	(0,6,0,0)	1800
(6,8,4,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,7,5,0)	(0,2,4,0)	2200	(11,1,7,1)	(0,0,3,1)	2200	(15,0,4,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,8,5,1)	(0,2,2,1)	2400	(8,8,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(11,1,8,0)	(0,1,5,0)	2300	(15,0,5,0)	(0,0,5,0)	2000
(6,8,6,0)	(0,1,5,0)	2300	(8,8,3,1)	(0,0,3,1)	2200	(11,2,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(15,1,3,1)	(0,1,2,1)	2100
(6,9,3,2)	(0,0,1,2)	2400	(8,8,4,0)	(0,2,4,0)	2200	(11,2,6,1)	(0,0,3,1)	2200	(15,1,4,0)	(0,1,4,0)	1900
(6,9,4,1)	(0,3,1,1)	2300	(8,9,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(11,2,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(15,2,2,1)	(0,1,2,1)	2100
(6,9,5,0)	(0,1,5,0)	2300	(8,9,2,1)	(0,4,0,1)	2200	(11,3,4,2)	(0,1,0,2)	2300	(15,2,3,0)	(0,2,3,0)	1800
(6,10,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(8,9,3,0)	(0,6,1,0)	2200	(11,3,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(15,3,1,1)	(0,2,1,1)	2000
(6,10,3,1)	(0,3,1,1)	2300	(8,10,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(11,3,6,0)	(0,2,4,0)	2200	(15,3,2,0)	(0,3,2,0)	1700
(6,10,4,0)	(0,5,2,0)	2300	(8,10,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(11,4,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(15,4,0,1)	(0,3,0,1)	1900
(6,11,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(8,10,2,0)	(0,6,1,0)	2200	(11,4,4,1)	(0,0,3,1)	2200	(15,4,1,0)	(0,4,1,0)	1600
(6,11,2,1)	(0,3,1,1)	2300	(8,11,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(11,4,5,0)	(0,2,4,0)	2200	(15,5,0,0)	(0,5,0,0)	1500
(6,11,3,0)	(0,5,2,0)	2300	(8,11,1,0)	(0,6,1,0)	2200	(11,5,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(16,0,3,1)	(0,0,3,1)	2200
(6,12,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(8,12,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(11,5,3,1)	(0,0,3,1)	2200	(16,0,4,0)	(0,0,4,0)	1600
(6,12,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(9,0,9,2)	(0,0,1,2)	2400	(11,5,4,0)	(0,2,4,0)	2200	(16,1,2,1)	(0,1,2,1)	2100
(6,12,2,0)	(0,6,1,0)	2200	(9,0,10,1)	(0,0,4,1)	2600	(11,6,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(16,1,3,0)	(0,1,3,0)	1500
(6,13,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(9,0,11,0)	(0,0,6,0)	2400	(11,6,2,1)	(0,1,2,1)	2100	(16,2,1,1)	(0,2,1,1)	2000
(6,13,1,0)	(0,6,1,0)	2200	(9,1,8,2)	(0,0,1,2)	2400	(11,6,3,0)	(0,3,3,0)	2100	(16,2,2,0)	(0,2,2,0)	1400
(6,14,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(9,1,9,1)	(0,0,4,1)	2600	(11,7,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(16,3,0,1)	(0,3,0,1)	1900
(7,0,11,2)	(0,0,2,2)	2800	(9,1,10,0)	(0,0,6,0)	2400	(11,7,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(16,3,1,0)	(0,3,1,0)	1300
(7,0,12,1)	(0,0,4,1)	2600	(9,2,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(11,7,2,0)	(0,4,2,0)	2000	(16,4,0,0)	(0,4,0,0)	1200
(7,0,13,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,2,8,1)	(0,1,3,1)	2500	(11,8,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(17,0,2,1)	(0,0,2,1)	1800
(7,1,10,2)	(0,0,2,2)	2800	(9,2,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(11,8,1,0)	(0,5,1,0)	1900	(17,0,3,0)	(0,0,3,0)	1200
(7,1,11,1)	(0,0,4,1)	2600	(9,3,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(11,9,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(17,1,1,1)	(0,1,1,1)	1700
(7,1,12,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,3,7,1)	(0,0,3,1)	2200	(12,0,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(17,1,2,0)	(0,1,2,0)	1100
(7,2,9,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,3,8,0)	(0,1,5,0)	2300	(12,0,7,1)	(0,0,3,1)	2200	(17,2,0,1)	(0,2,0,1)	1600
(7,2,10,1)	(0,0,4,1)	2600	(9,4,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(12,0,8,0)	(0,0,6,0)	2400	(17,2,1,0)	(0,2,1,0)	1000
(7,2,11,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,4,6,1)	(0,0,3,1)	2200	(12,1,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(17,3,0,0)	(0,3,0,0)	900
(7,3,8,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,4,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(12,1,6,1)	(0,0,3,1)	2200	(18,0,1,1)	(0,0,1,1)	1400
(7,3,9,1)	(0,0,4,1)	2600	(9,5,4,2)	(0,0,1,2)	2400	(12,1,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(18,0,2,0)	(0,0,2,0)	800
(7,3,10,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,5,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(12,2,4,2)	(0,1,0,2)	2300	(18,1,0,1)	(0,1,0,1)	1300
(7,4,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,5,6,0)	(0,1,5,0)	2300	(12,2,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(18,1,1,0)	(0,1,1,0)	700
(7,4,8,1)	(0,1,3,1)	2500	(9,6,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(12,2,6,0)	(0,2,4,0)	2200	(18,2,0,0)	(0,2,0,0)	600
(7,4,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,6,4,1)	(0,0,3,1)	2200	(12,3,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(19,0,1,0)	(0,0,1,0)	400
(7,5,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,6,5,0)	(0,2,4,0)	2200	(12,3,4,1)	(0,0,3,1)	2200	(19,1,0,0)	(0,1,0,0)	300
(7,5,7,1)	(0,1,3,1)	2500	(9,7,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(12,3,5,0)	(0,2,4,0)	2200			
(7,5,8,0)	(0,0,6,0)	2400	(9,7,3,1)	(0,0,3,1)	2200	(12,4,2,2)	(0,1,0,2)	2300			
(7,6,5,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,7,4,0)	(0,2,4,0)	2200	(12,4,3,1)	(0,0,3,1)	2200			
(7,6,6,1)	(0,2,2,1)	2400	(9,8,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(12,4,4,0)	(0,2,4,0)	2200			
(7,6,7,0)	(0,1,5,0)	2300	(9,8,2,1)	(0,4,0,1)	2200	(12,5,1,2)	(0,1,0,2)	2300			
(7,7,4,2)	(0,0,1,2)	2400	(9,8,3,0)	(0,3,3,0)	2100	(12,5,2,1)	(0,1,2,1)	2100			
(7,7,5,1)	(0,0,3,1)	2200	(9,9,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(12,5,3,0)	(0,3,3,0)	2100			
(7,7,6,0)	(0,1,5,0)	2300	(9,9,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(12,6,1,1)	(0,2,1,1)	2000			
(7,8,3,2)	(0,1,0,2)	2300	(9,9,2,0)	(0,6,1,0)	2200	(12,6,2,0)	(0,4,2,0)	2000			
(7,8,4,1)	(0,3,1,1)	2300	(9,10,0,1)	(0,4,0,1)	2200	(12,7,0,1)	(0,3,0,1)	1900			
(7,8,5,0)	(0,1,5,0)	2300	(9,10,1,0)	(0,6,1,0)	2200	(12,7,1,0)	(0,5,1,0)	1900			
(7,9,2,2)	(0,1,0,2)	2300	(9,11,0,0)	(0,7,0,0)	2100	(12,8,0,0)	(0,6,0,0)	1800			
(7,9,3,1)	(0,3,1,1)	2300	(10,0,8,2)	(0,0,1,2)	2400	(13,0,5,2)	(0,0,1,2)	2400			
(7,9,4,0)	(0,2,4,0)	2200	(10,0,9,1)	(0,0,4,1)	2600	(13,0,6,1)	(0,0,3,1)	2200			
(7,10,1,2)	(0,1,0,2)	2300	(10,0,10,0)	(0,0,6,0)	2400	(13,0,7,0)	(0,0,6,0)	2400			
(7,10,2,1)	(0,3,1,1)	2300	(10,1,7,2)	(0,0,1,2)	2400	(13,1,4,2)	(0,1,0,2)	2300			
(7,10,3,0)	(0,6,1,0)	2200	(10,1,8,1)	(0,0,3,1)	2200	(13,1,5,1)	(0,0,3,1)	2200			
(7,11,0,2)	(0,1,0,2)	2300	(10,1,9,0)	(0,0,6,0)	2400	(13,1,6,0)	(0,1,5,0)	2300			
(7,11,1,1)	(0,4,0,1)	2200	(10,2,6,2)	(0,0,1,2)	2400	(13,2,3,2)	(0,1,0,2)	2300			
(7,11,2,0)	(0,6,1,0)	2200	(10,2,7,1)	(0,0,3,1)	2200	(13,2,4,1)	(0,0,3,1)	2200			

付表-2 $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-4}$ における最適補修施策の厳密解

n_m^*	$\Delta n_m^*(d^*)$	C_s^d	n_m^*	$\Delta n_m^*(d^*)$	C_s^d	n_m^*	$\Delta n_m^*(d^*)$	C_s^d	n_m^*	$\Delta n_m^*(d^*)$	C_s^d
(0,0,19,1)	(0,0,2,1)	1800	(2,6,12,0)	(0,4,0,0)	1200	(5,8,7,0)	(0,3,0,0)	900	(11,2,7,0)	(0,2,0,0)	600
(0,0,20,0)	(0,0,5,0)	2000	(2,7,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(5,9,6,0)	(0,3,0,0)	900	(11,3,6,0)	(0,3,0,0)	900
(0,1,18,1)	(0,0,2,1)	1800	(2,7,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(5,10,5,0)	(0,3,0,0)	900	(11,4,5,0)	(0,2,0,0)	600
(0,1,19,0)	(0,0,4,0)	1600	(2,8,9,1)	(0,1,0,1)	1300	(5,11,4,0)	(0,3,0,0)	900	(11,5,4,0)	(0,2,0,0)	600
(0,2,17,1)	(0,0,2,1)	1800	(2,8,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(5,12,3,0)	(0,3,0,0)	900	(11,6,3,0)	(0,2,0,0)	600
(0,2,18,0)	(0,0,4,0)	1600	(2,9,8,1)	(0,1,0,1)	1300	(5,13,2,0)	(0,3,0,0)	900	(11,7,2,0)	(0,2,0,0)	600
(0,3,16,1)	(0,0,2,1)	1800	(2,9,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(5,14,1,0)	(0,3,0,0)	900	(11,8,1,0)	(0,2,0,0)	600
(0,3,17,0)	(0,0,4,0)	1600	(2,10,8,0)	(0,4,0,0)	1200	(5,15,0,0)	(0,2,0,0)	600	(11,9,0,0)	(0,2,0,0)	600
(0,4,15,1)	(0,0,1,1)	1400	(2,11,7,0)	(0,4,0,0)	1200	(6,0,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(12,0,8,0)	(0,0,1,0)	400
(0,4,16,0)	(0,0,4,0)	1600	(2,12,6,0)	(0,3,0,0)	900	(6,0,14,0)	(0,0,3,0)	1200	(12,1,7,0)	(0,1,1,0)	700
(0,5,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(2,13,5,0)	(0,3,0,0)	900	(6,1,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(12,2,6,0)	(0,2,0,0)	600
(0,5,15,0)	(0,1,3,0)	1500	(2,14,4,0)	(0,3,0,0)	900	(6,1,13,0)	(0,1,2,0)	1100	(12,3,5,0)	(0,2,0,0)	600
(0,6,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(2,15,3,0)	(0,3,0,0)	900	(6,2,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(12,4,4,0)	(0,2,0,0)	600
(0,6,14,0)	(0,2,2,0)	1400	(2,16,2,0)	(0,3,0,0)	900	(6,2,12,0)	(0,2,1,0)	1000	(12,5,3,0)	(0,2,0,0)	600
(0,7,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(2,17,1,0)	(0,3,0,0)	900	(6,3,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(12,6,2,0)	(0,2,0,0)	600
(0,7,13,0)	(0,3,1,0)	1300	(2,18,0,0)	(0,3,0,0)	900	(6,3,11,0)	(0,3,0,0)	900	(12,7,1,0)	(0,2,0,0)	600
(0,8,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,0,16,1)	(0,0,1,1)	1400	(6,4,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(12,8,0,0)	(0,2,0,0)	600
(0,8,12,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,0,17,0)	(0,0,4,0)	1600	(6,5,9,0)	(0,3,0,0)	900	(13,0,7,0)	(0,0,1,0)	400
(0,9,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,1,15,1)	(0,0,1,1)	1400	(6,6,8,0)	(0,3,0,0)	900	(13,1,6,0)	(0,1,0,0)	300
(0,9,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,1,16,0)	(0,1,3,0)	1500	(6,7,7,0)	(0,3,0,0)	900	(13,2,5,0)	(0,2,0,0)	600
(0,10,9,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,2,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(6,8,6,0)	(0,3,0,0)	900	(13,3,4,0)	(0,2,0,0)	600
(0,10,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,2,15,0)	(0,2,2,0)	1400	(6,9,5,0)	(0,3,0,0)	900	(13,4,3,0)	(0,2,0,0)	600
(0,11,8,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,3,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(6,10,4,0)	(0,3,0,0)	900	(13,5,2,0)	(0,2,0,0)	600
(0,11,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,3,14,0)	(0,2,2,0)	1400	(6,11,3,0)	(0,3,0,0)	900	(13,6,1,0)	(0,2,0,0)	600
(0,12,7,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,4,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(6,12,2,0)	(0,3,0,0)	900	(13,7,0,0)	(0,2,0,0)	600
(0,12,8,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,4,13,0)	(0,3,1,0)	1300	(6,13,1,0)	(0,2,0,0)	600	(14,0,6,0)	(0,0,1,0)	400
(0,13,6,1)	(0,1,0,1)	1300	(3,5,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(6,14,0,0)	(0,2,0,0)	600	(14,1,5,0)	(0,1,0,0)	300
(0,13,7,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,5,12,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,0,13,0)	(0,0,3,0)	1200	(14,2,4,0)	(0,2,0,0)	600
(0,14,6,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,6,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(7,1,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(14,3,3,0)	(0,2,0,0)	600
(0,15,5,0)	(0,4,0,0)	1200	(3,6,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,1,12,0)	(0,1,2,0)	1100	(14,4,2,0)	(0,2,0,0)	600
(0,16,4,0)	(0,3,0,0)	900	(3,7,9,1)	(0,1,0,1)	1300	(7,2,11,0)	(0,2,1,0)	1000	(14,5,1,0)	(0,2,0,0)	600
(0,17,3,0)	(0,3,0,0)	900	(3,7,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,3,10,0)	(0,3,0,0)	900	(14,6,0,0)	(0,1,0,0)	300
(0,18,2,0)	(0,3,0,0)	900	(3,8,8,1)	(0,1,0,1)	1300	(7,4,9,0)	(0,3,0,0)	900	(15,0,5,0)	(0,0,1,0)	400
(0,19,1,0)	(0,3,0,0)	900	(3,8,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,5,8,0)	(0,3,0,0)	900	(15,1,4,0)	(0,1,0,0)	300
(0,20,0,0)	(0,3,0,0)	900	(3,9,8,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,6,7,0)	(0,3,0,0)	900	(15,2,3,0)	(0,2,0,0)	600
(1,0,18,1)	(0,0,2,1)	1800	(3,10,7,0)	(0,4,0,0)	1200	(7,7,6,0)	(0,3,0,0)	900	(15,3,2,0)	(0,2,0,0)	600
(1,0,19,0)	(0,0,4,0)	1600	(3,11,6,0)	(0,3,0,0)	900	(7,8,5,0)	(0,3,0,0)	900	(15,4,1,0)	(0,2,0,0)	600
(1,1,17,1)	(0,0,2,1)	1800	(3,12,5,0)	(0,3,0,0)	900	(7,9,4,0)	(0,3,0,0)	900	(15,5,0,0)	(0,1,0,0)	300
(1,1,18,0)	(0,0,4,0)	1600	(3,13,4,0)	(0,3,0,0)	900	(7,10,3,0)	(0,3,0,0)	900	(16,1,3,0)	(0,1,0,0)	300
(1,2,16,1)	(0,0,2,1)	1800	(3,14,3,0)	(0,3,0,0)	900	(7,11,2,0)	(0,2,0,0)	600	(16,2,2,0)	(0,2,0,0)	600
(1,2,17,0)	(0,0,4,0)	1600	(3,15,2,0)	(0,3,0,0)	900	(7,12,1,0)	(0,2,0,0)	600	(16,3,1,0)	(0,1,0,0)	300
(1,3,15,1)	(0,0,1,1)	1400	(3,16,1,0)	(0,3,0,0)	900	(7,13,0,0)	(0,2,0,0)	600	(16,4,0,0)	(0,1,0,0)	300
(1,3,16,0)	(0,1,3,0)	1500	(3,17,0,0)	(0,3,0,0)	900	(8,0,12,0)	(0,0,2,0)	800	(17,1,2,0)	(0,1,0,0)	300
(1,4,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(4,0,15,1)	(0,0,1,1)	1400	(8,1,11,0)	(0,1,2,0)	1100	(17,2,1,0)	(0,1,0,0)	300
(1,4,15,0)	(0,1,3,0)	1500	(4,0,16,0)	(0,0,3,0)	1200	(8,2,10,0)	(0,2,1,0)	1000	(17,3,0,0)	(0,1,0,0)	300
(1,5,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(4,1,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(8,3,9,0)	(0,3,0,0)	900	(18,1,1,0)	(0,1,0,0)	300
(1,5,14,0)	(0,2,2,0)	1400	(4,1,15,0)	(0,0,3,0)	1200	(8,4,8,0)	(0,3,0,0)	900	(18,2,0,0)	(0,1,0,0)	300
(1,6,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,2,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(8,5,7,0)	(0,3,0,0)	900	(19,1,0,0)	(0,1,0,0)	300
(1,6,13,0)	(0,3,1,0)	1300	(4,2,14,0)	(0,2,2,0)	1400	(8,6,6,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,7,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,3,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(8,7,5,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,7,12,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,3,13,0)	(0,3,1,0)	1300	(8,8,4,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,8,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,4,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(8,9,3,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,8,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,4,12,0)	(0,4,0,0)	1200	(8,10,2,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,9,9,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,5,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(8,11,1,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,9,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,5,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(8,12,0,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,10,8,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,6,9,1)	(0,1,0,1)	1300	(9,0,11,0)	(0,0,2,0)	800			
(1,10,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,6,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(9,1,10,0)	(0,1,1,0)	700			
(1,11,7,1)	(0,1,0,1)	1300	(4,7,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(9,2,9,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,11,8,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,8,8,0)	(0,4,0,0)	1200	(9,3,8,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,12,7,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,9,7,0)	(0,3,0,0)	900	(9,4,7,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,13,6,0)	(0,4,0,0)	1200	(4,10,6,0)	(0,3,0,0)	900	(9,5,6,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,14,5,0)	(0,3,0,0)	900	(4,11,5,0)	(0,3,0,0)	900	(9,6,5,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,15,4,0)	(0,3,0,0)	900	(4,12,4,0)	(0,3,0,0)	900	(9,7,4,0)	(0,3,0,0)	900			
(1,16,3,0)	(0,3,0,0)	900	(4,13,3,0)	(0,3,0,0)	900	(9,8,3,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,17,2,0)	(0,3,0,0)	900	(4,14,2,0)	(0,3,0,0)	900	(9,9,2,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,18,1,0)	(0,3,0,0)	900	(4,15,1,0)	(0,3,0,0)	900	(9,10,1,0)	(0,2,0,0)	600			
(1,19,0,0)	(0,3,0,0)	900	(4,16,0,0)	(0,2,0,0)	600	(9,11,0,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,0,17,1)	(0,0,2,1)	1800	(5,0,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(10,0,10,0)	(0,0,2,0)	800			
(2,0,18,0)	(0,0,4,0)	1600	(5,0,15,0)	(0,0,3,0)	1200	(10,1,9,0)	(0,1,1,0)	700			
(2,1,16,1)	(0,0,2,1)	1800	(5,1,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(10,2,8,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,1,17,0)	(0,0,4,0)	1600	(5,1,14,0)	(0,1,2,0)	1100	(10,3,7,0)	(0,3,0,0)	900			
(2,2,15,1)	(0,0,1,1)	1400	(5,2,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(10,4,6,0)	(0,3,0,0)	900			
(2,2,16,0)	(0,1,3,0)	1500	(5,2,13,0)	(0,1,2,0)	1100	(10,5,5,0)	(0,3,0,0)	900			
(2,3,14,1)	(0,0,1,1)	1400	(5,3,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(10,6,4,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,3,15,0)	(0,1,3,0)	1500	(5,3,12,0)	(0,3,1,0)	1300	(10,7,3,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,4,13,1)	(0,0,1,1)	1400	(5,4,10,1)	(0,1,0,1)	1300	(10,8,2,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,4,14,0)	(0,2,2,0)	1400	(5,4,11,0)	(0,4,0,0)	1200	(10,9,1,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,5,12,1)	(0,1,0,1)	1300	(5,5,10,0)	(0,4,0,0)	1200	(10,10,0,0)	(0,2,0,0)	600			
(2,5,13,0)	(0,3,1,0)	1300	(5,6,9,0)	(0,4,0,0)	1200	(11,0,9,0)	(0,0,2,0)	800			
(2,6,11,1)	(0,1,0,1)	1300	(5,7,8,0)	(0,3,0,0)	900	(11,1,8,0)	(0,1,1,0)	700			

参考文献

- 1) 小林潔司, 江口利率, 大井明, 青木一也, 貝戸清之: 劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の最適実施方策, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 67, No. 2, pp.75-90, 2011.
- 2) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集, No. 667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 3) 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.
- 4) 近田康夫, 阿曾克司, 佐々木貴惟, 城戸隆良: 年次費用均等化を考慮した既存橋梁群の補修計画支援, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp.134-141, 2008.
- 5) Yoon, Y., Shah, H., Hastak, M. and Lee, J.: Leveling process of annual budgetary requirements for pavement preservation, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.20, Issue 1, 2014.
- 6) Yoon, Y., Hastak, M. and Cho, K.: Method for generating multiple MRR solutions for application in cost-leveling models, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.23, Issue 3, 2016.
- 7) Boyles, S., Zhang, Z., and Waller, S.: Optimal Maintenance and Repair Policies under Nonlinear Preferences, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.16, Issue 1, pp.11-20, 2010.
- 8) Markowitz H. M.: Portfolio selection: *The Journal of Finance*, Vol.7, pp.77-91, 1952.
- 9) Mizutani, D., Nakazato, Y. and Lee, J.: Network-level synchronized pavement repair and work zone policies: Optimal solution and rule-based approximation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.120, 102797, 2020.
- 10) Smilowitz, K. and Madanat, S.: Optimal Inspection and Maintenance Policies for Infrastructure Networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.15, pp.5-13, 2000.
- 11) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27B, pp.425-438, 1993.