

管理者行動の影響を考慮した インフラ維持管理計画の策定

大澤遼一¹・本田利器²

¹学生会員 東京大学大学院 修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: osawa-r@ip.civil.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 工博 東京大学大学院 新領域創成科学研究科国際協力学専攻 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

インフラの維持管理計画の策定は、LCC 最小化等の動学的最適化問題として扱われることが多い。しかし、維持管理の現場では、管理者は、安全性を重視し、点検で状態が悪いと判定されたものから優先的に補修する。この際優先順位付けの基準となる点検結果は必ずしも構造物の状態を正確には反映していない。先行研究では、維持管理を通して、こうした不正確さの影響が蓄積し、計画の危険性を示すリスクカーブの確率的性質が変化する可能性が示唆されている。

本研究では、管理者行動の影響に伴うリスクカーブの確率的性質の変化を考慮した上で、維持管理計画を策定する手法について検討した。その結果、計画の危険性については CVaR や EVaR 等の確率密度関数のうち Tail 部の形状に基づき危険性を評価するリスク尺度を用いることで、リスクカーブの確率的性質の変化を考慮できることが確認された。また、こうした危険性評価と予算の充足性の評価を合わせることで、適切な計画群が求まることが分かった。

Key Words: maintenance, human error, tail risk, risk measure, resource allocation

1. 序論

(1) 背景

土木施設 (以後インフラ) の維持管理は様々な不確実性の下で、効率性、使用性、安全性等を目的として経験的に実施されてきた。こうした暗黙知をモデル化し、より合理的に計画策定を行うことを目的にアセットマネジメントの研究が実施されている¹⁾。このうち、維持管理の計画策定理論に関する研究では、主に効率性が重視されてきた。

一方、2012 年に発生した笹子トンネル天井板落下事故を契機に、維持管理における安全性の確保が重視されるようになった。今後、供用期間の長いインフラが増え補修・修繕・更新などの増加が見られる。維持管理が適切に行われなければ、事故発生数の増加などに繋がる恐れがある。維持管理計画の策定においては、こうした安全性の考慮も不可欠である。

道路陥没、橋梁の崩落、構造物の一部の落下に伴う第三者被害などがインフラ事故として挙げられる。これらの多くが施工不良や維持管理実施に際して正確には構造物状態や劣化速度を把握できないことなどに起因して発生している。

このうち本稿では、維持管理実施に伴う不正確さや不確実性が維持管理という動的プロセスを通して効率性や危険性に及ぼす影響に着目した際の、計画策定手

法について検討した。

(2) 計画策定における短期的意思決定の考慮

インフラ管理者が複数の施設を保有する場合には、予算平準化の必要性などから、各時点において予算制約が発生する (例えば年度毎など)。この場合、各時点における予算配分の意思決定について何らかのルールを設定し、そのルールに基づくモデルを用いて長期の計画を実施した際の結果を予測し、何らかの基準に基づき計画の妥当性を評価することとなる。

各時点における予算配分の意思決定について、田村ら³⁾は、予算制約下では「補修遅れに伴う損失/補修費用」が大きいものから順に補修を行うというルールを設けている。すなわち補修の意思決定が、効率性に基づいて行われることを想定している。長期的に確保すべき予算については、保有する構造物群の状態値の平均値に基づき、予算が十分か確認されている。

一方、Seyedshohadaie ら⁴⁾は、金融工学において開発された Risk Measure である Conditional Value at Risk (以下 CVaR) を用いて、各施設の次時点のリスク評価値のうち、リスクが最も大きい施設のリスク値を最小化するように予算配分を行うというルールを提示している。すなわち補修の意思決定が状態値を Risk Measure で評価した値に基づいて行われると想定している。

表-1 本稿の提案する手法と既往の手法の違い

	田村ら ³⁾	Seyedshohadaie ら ⁴⁾	坂井ら ⁵⁾	本稿
各時点の予算配分の指標	補修遅れによる損失	次時点の状態値の CVaR	状態値	観測値
考慮する不確実性	劣化予測	劣化予測	劣化予測	劣化予測・点検
長期的予算計画の指標	構造物群の平均状態値	(検討なし)	補修必要数	予算充足・危険性

また坂井ら⁵⁾は予算不足時には健全度が低い箇所が優先的に補修されるものとして将来予測のシミュレーションを実施している。すなわち補修の意思決定が、各時点の状態値に基づいて行われることを想定している。長期的に確保すべき予算については、構造物群のうち補修が必要だが残存してしまう構造物の割合の確率分布を Value at Risk で評価した値に基づいて決められている。

管理者は事故の発生を避けるため、短期的には危険性を低減することを重視して意思決定すると考えられる。そのため、維持管理行動の影響を正確に考慮するためには、管理者が予算範囲内で危険性に基づいて優先度を判断して補修を行うことを考慮する必要がある。

また、管理者が予算配分の意思決定を行う際、点検の不確実性の影響については、いずれにおいても考慮されていない。大澤ら⁶⁾では、不確実性を有する点検の結果に基づいて各時点の予算配分がなされると仮定したところ、点検の不確実性の増大に伴い、インフラの状態値の分布のうち危険な事象の発生確率について、確率密度関数の Tail 部の厚みが増すという形で危険性が増大することが示された。これは、点検の不確実性が維持管理のプロセスの中で蓄積されることで生じる危険性と考えられる。維持管理の計画策定においては、点検などに含まれる維持管理行動の不確実性に起因する危険性も考慮する必要があるだろう。

長期的な予算計画の策定において、田村ら³⁾は保有する構造物群の状態値の平均値、坂井ら⁵⁾は構造物群の補修必要割合に基づいて計画の妥当性を評価している。これらはいずれも、決定した予算計画を実行した際、補修が追いつかず、補修が必要な施設数が増加していくというリスクを評価していることに該当する。すなわち予算の充足性の観点からの評価に該当する。

一方本稿では、管理行動の不確実性が、非常に危険な事故に繋がりうる事象の発生確率を低減するという観点も考慮した維持管理計画の策定手法を提案することを目的とする。そこで、長期予算を決定する際には、従来考慮されてきた予算の充足性だけでなく、危険な事象の発生確率を低減するという視点を考慮することとなる。

本稿の提案する手法と既往の手法との違いを表-1に示す。

2. 危険性を考慮した計画策定

事故などに繋がる危険性を考慮した計画策定について検討するために、(1)維持管理において危険性を考慮して計画する手法を提案している研究、(2)金融工学における危険性を考慮した計画手法、の2つを概観する。

(1) 維持管理における危険性の考慮

まず、インフラ維持管理の計画策定において危険性を考慮して計画策定している研究を概観する。

小池⁷⁾は、ガスパイプラインの維持管理において、事故リスクを期待被害額としてライフサイクルコストに算入することで、事故発生のリスクを考慮に入れている。しかし、ある事象のもたらす被害が大きいくほど、その事象の発生確率を低下させたい」というリスク回避的選好を反映したものではない。Smilowitz & Madanat⁸⁾は、各時点において構造物群のうち各状態に該当する施設の割合を一定以下に抑えるという制約を用いて危険性を考慮している。その上で、期待コストを最小化するようにマルコフ決定過程として定式化を行い、最適な計画を求めるものとしている。Liu & Frangopol⁹⁾は、橋梁維持管理において、必要な活荷重に耐えうる施設の割合に基づいて評価される安全性指標が取りうる最も悪い値を、その計画の危険性としている。ここでは効率性などと合わせ、遺伝的アルゴリズムを用いて複数目的最適化を実施した際の最適な維持管理計画群を遺伝的アルゴリズムを用いて導出している。大澤ら⁶⁾では、点検の不確実性の増大に伴い、インフラの状態値の分布のうち、危険な事象の確率分布の Tail 部が厚みを増すという形で危険性が増大することが確認された。しかし、既往研究においては、いずれも危険性を示す確率分布の確率的特性まで考慮した評価はなされていない。

(2) Risk Measure

維持管理以外の分野でも、リスクを考慮した意思決定手法は様々な分野で複数提案されてきた。ここでは、金融工学で用いられている Risk Measure の利用を考える。

各時点毎の状況の変化を踏まえた意思決定を必要としない場合には、One-period Risk Measure(以下一期間リスク尺度)を用いることが出来る。一期間リスク尺度 $\rho_t(X_T)$ は、時点 t において、時点 $T(\geq t)$ における確率変数 X の危険性を定量的に評価するものである。これらのうち、意思決定に用いる手法として望ましいものは coherent 性という性質を満たすと指摘されている¹⁰⁾。具体的には、Mean-Semideviation(式 (1))¹¹⁾、CVaR(式 (2))¹²⁾ や Entropic Value at Risk(以下 EVaR, 式 (3))¹³⁾ などがこれに該当する。ただし、 X_t は $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ 上の確率変数とする。また、 $(z)_+ = \max(0, z)$ である。

$$\rho_{t,\lambda}(X_T) = E[X_T | \mathcal{F}_t] + \lambda E[\{(X_T - E[X_T | \mathcal{F}_t])_+\}^2 | \mathcal{F}_t]^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{CVaR}_{\alpha,t}(X_T) = \inf_{k \in \mathbb{R}} \left\{ k + \frac{1}{\alpha} E[(X_T - k)_+ | \mathcal{F}_t] \right\} \quad (2)$$

$$\text{EVaR}_{\alpha,t}(X_T) = \inf_{z > 0} \{ z^{-1} \ln(M_{X_T}(z)/1 - \alpha) | \mathcal{F}_t \} \quad (3)$$

本稿ではこうした Coherent 性を有する一期間リスク尺度を用いて、計画の危険性を評価するものとする。この際、用いる評価手法の違いに伴う意思決定結果の変化を考慮し、適切な評価手法について検討する。

また、問題の動学性を考慮して最適化を図るための考え方として、Dynamic Risk Measure(動的リスク尺度)¹⁵⁾ の考え方も提案されており、この動的リスク尺度を意思決定に用いる手法も複数提案されている^{16),17)}。これらの手法は理論的には維持管理計画へも適用可能である。ただし、考慮すべき事象の数が増加すれば、動的リスク尺度を用いた Bellman 方程式を解析的に解けることはほとんどあり得ず、また数値シミュレーションにより解くのは、計算量の負担が膨大となるため事実上不可能であると思われる。従って、実際の維持管理問題へ適用するには、前進的に近似解を求めることが必要になる。

3. 維持管理計画の評価方法

ここでは、リスクの評価と、予算の充足性という2点を考慮して、維持管理計画を評価するための考え方について述べる。上述したように、最適化計画を求め際には、非線形最適化手法を導入した考え方なども必要となると思われるが、本稿では、維持管理行動の不正確さの影響を捉えた評価が可能であることを示す

ことを目的とする。そのため、最適化については考慮せず、既存の複数の計画を比較することを考える。

まず、管理者は構造物 N 個で構成された構造物群を保有し、構造物群が従う劣化関数や、管理者が行う点検の誤差が従う確率分布などは既知であると仮定する。また、構造物 i の状態値を確率変数 $X_i(t)$ 、構造物群全体の状態値の確率変数を $X(t)$ と表す。管理者の各時点における行動を $\pi(t)$ とする。

この時、管理者は以下のようなプロセスを経て、 $t=0$ 時点において、 $0 \leq t \leq T$ 間における危険性と効率性の観点から望ましい計画群を求める。

各時点での状況の変化に伴う意思決定を考慮しないことから、シミュレーション型多期間計画モデル¹⁴⁾を用いてモデル化を行った。その上で、式 (4) に示すように、各時点における補修後の構造物群の状態の確率分布をリスク尺度を用いて評価した値の合計値を、事故につながる事象が起きる危険性を示す値とし、管理者はこれを低減することを目標の1つにするものとした。

$$\sum_{t=0}^T \rho_0(X(t), \pi(t)) \quad (4)$$

更に、維持管理予算が充足しているかを調べる必要がある。本稿では、この指標として田村ら³⁾同様、保有する施設の状態値の平均値を用いるものとした。管理者はこれを低減することも目標の1つにすることとした。

まとめると、以下のような手順となる。

1. 管理者は、考慮すべき計画 $\{\pi(t)\}_{0 \leq t \leq T}$ を全て列挙する
2. 管理者は、各時点 t における自身の行動 $\pi(t)$ に応じて、各時点の点検・補修終了時点での構造物群の状態値の確率変数 $X(t)$ をモンテカルロ・シミュレーションなどを用いて推定する
3. 各計画のリスク値 $\sum_{t=0}^T \rho_0(X_t, \pi_t)$ を求める (ただし ρ_t は一期間リスク尺度)
4. 各計画の予算の充足性 $\sum_{t=0}^T E[X(t)]$ を求める
5. 各計画のリスク値と予算の充足性との関係から、最適な計画群を求める

こうして求まる最適な計画群のうち、危険性と効率性の観点から、管理者が実施する計画を選択するものとする。

4. 数値シミュレーション

本節で用いるケースは、劣化速度、補修時のコストなどについて、道路舗装について検討した Ouyang ら¹⁹⁾の設定に従う。

管理者は構造物 N 個で構成された構造物群を有し、それらの劣化速度はマルコフ過程に従うものとする。た

だし、時点 t における構造物 i の状態 (舗装の粗さ) は連続値 $x_i(t) \geq 5$ (5 が最良) で表わすものとし、その時間変化は次式 (5) により表されるものとする。

$$x_i(t+1) = x_i(t) \exp(\xi) \quad (5)$$

ただし、 ξ は平均 0.05、標準偏差 0.01 の正規分布に従う確率変数である。

また補修に際しては、厚さ w [mm] 舗装を補修した時、式 (6) だけ補修費がかかるものとする。ただし、表記の簡略化のため、\$ 1000 を 1 単位とする。

$$M_i(w) = 3w + 150 \quad (6)$$

この際、構造物 i の状態は式 (7) に従い回復するものとする。

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t) - \frac{0.66w}{0.55 + 18.3/x_i(t)} \quad (7)$$

構造物群の管理者は 2 年おきに点検を行い、補修の意思決定を行うものとした。

目視点検では構造物の状態を正確には把握できないことが指摘されている²⁰⁾。そこで、構造物 i の状態 $x_i(t)$ に対して、観測値 $y_i(t)$ は式 (8) に従うものとした。

$$y_i(t) = x_i(t)\zeta \quad (8)$$

ただし、 ζ は平均 1、標準偏差 β に従う正規分布である。

点検時の誤差について、目視点検の場合どの程度のエラーが発生するか調べられている²⁰⁾。これより変動係数は 0.1 から 0.2 程度の間にいずれも収まっていることが確認できる。本稿では、目視点検の場合 $\beta = 0.15$ として以後の計算を行う。

本稿では 1. に示すように、管理者は各時点 t における予算制約の範囲内で目視点検の結果判断された構造物の危険度に応じて優先順位を定めて、順に補修を行うものとする。なお、Madanat ら²¹⁾ が指摘するように、点検誤差を有する際に、現在の観測値から構造物の状態値等を合理的に推定するには、劣化予測と過去の維持管理履歴からベイズの法則を用いるべきであるが、実際の維持管理においては、現時点での点検結果が重視されることを踏まえ、現在の観測値のみから推定することとした。

補修時には、常に状態 x_i が 5 となるように補修を行うものとした。以上を前提に最適な補修タイミングを求めたところ、 $x_i = 55$ の時に補修を行えば期待ライフサイクルコストが最小となると分かったため、これより状態値が悪いと点検の結果判断された施設のみ、予算の範囲内で補修するものとした。

5. シミュレーション結果

(1) 点検エラーが構造物群の危険性に及ぼす影響

ここでは点検における不確実性の影響が、構造物群の状態値の危険性に与える影響を調べる。

$N = 100$ 、初期時点 $t = 0$ における構造物の状態値は、

$$\begin{cases} \text{確率密度関数: } f(x) = \frac{55-x}{1250} \\ \text{累積分布関数: } F(x) = \frac{-x^2+110x-525}{2500} \end{cases} \quad (9)$$

に従い、 $x \in [5, 55]$ とする。

その後管理者は式 (10) の t 時点の予算 B_t に従い管理を行ったものと仮定する。

$$B_t = \begin{cases} 2500 (t = 2, 4, 6, 8, 10) \\ 0 (\text{その他}) \end{cases} \quad (10)$$

以降の節では、基本的に以上を初期設定とする。

ここでは、点検エラーと、予算が十分になく補修が追いつかないという事象が、構造物群の状態に与える影響を調べる。

まず、点検誤差幅の大きさを $\beta = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ と変化させた 5 ケースについて、管理者が $t = 0$ 時点で有する情報を元に $t = 10$ 時点で、管理者が保有する全ての構造物のうち最も状態値が大きく危険な構造物の状態値の超過確率分布を対数-対数グラフにプロットしたものを調べた。並びに管理者が有するすべての構造物から無作為に選ばれた、ある特定の構造物の状態値の超過確率分布を縦軸が対数のグラフにプロットしたものを調べた。これらの超過確率分布を 10,000 回のモンテカルロ・シミュレーションを実施し調べた。前者を図-1、後者を図-2 に示す。後者は、管理者が保有する N 個の構造物から、ある特定の 1 つの構造物を選び、その状態値の確率分布を示したものであるが、これは $t = 10$ 時点で管理者が保有する構造物の中から無作為に 1 つ選んだ場合と同義であるから、 $t = 10$ 時点での構造物群の状態値のヒストグラムに相当する確率分布であると言える。

いずれにおいても、点検誤差の発生により、構造物の状態値が大きく危険な事象の発生確率が增大していることが確認できる。特に、管理者が保有する構造物群のうち、最も危険な構造物の状態値については、経験累積分布の一部が両対数グラフ上で傾きを増すという形で危険性が增大していることが確認できる。

次に予算が不足することの影響を調べる。同様に、点検誤差幅の大きさを $\beta = 0$ とし、予算が変化した場合として、 $B_t = 1500, 2000, 2500, 3000$ の場合の危険性の変化をそれぞれ調べた。結果を図-3、図-4 に示す。

図-4 より、予算が不足し補修が十分に行えないことで、保有する構造物の状態は全体的に悪くなっている事が分かる。また、図-3 より、管理者が保有する構造

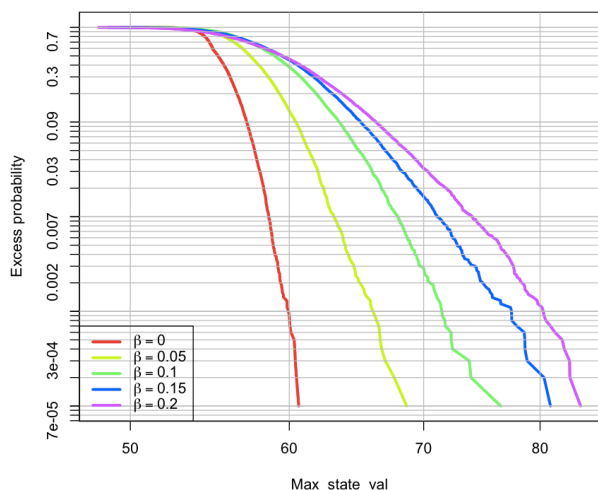


図-1 全ての構造物のうち最も危険な構造物の状態値の経験超過確率分布 (点検誤差幅が変化した場合)

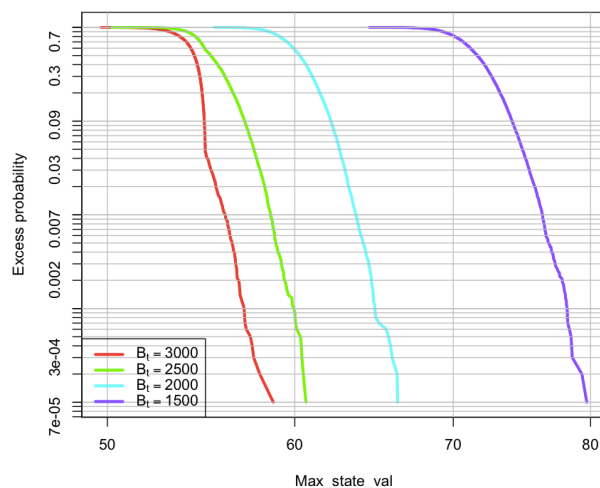


図-3 全ての構造物のうち最も危険な構造物の状態値の経験超過確率分布 (予算が不足した場合)

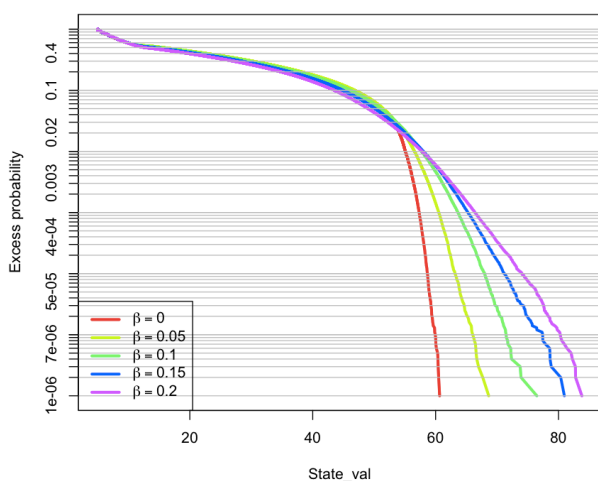


図-2 ある特定の構造物の状態値の経験超過確率分布 (点検誤差幅が変化した場合)

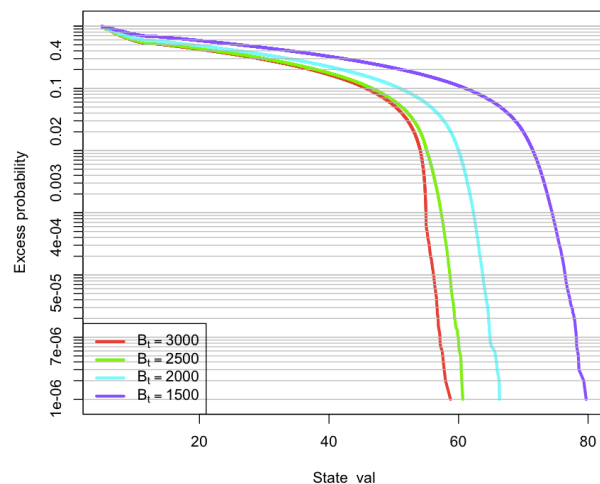


図-4 ある特定の構造物の状態値の経験超過確率分布 (予算が不足した場合)

物のうち最も危険な構造物の状態値については、両対数グラフ上で形状をほぼ保ったまま平行移動していることが確認できる。すなわち、補修に必要な予算が不足しても、危険な状態の発生確率の分布の確率的特性は保持されることが分かる。

これに対し、点検誤差幅が増大する場合には、確率密度関数のうち危険な状態の発生確率に該当する部分である Tail 部が厚くなるという形で危険な事象が発生しやすくなる変化をしていることが分かった。その結果、予算が不足する場合と比較して、状態値が非常に大きくなるような危険な事象の発生確率が著しく上昇している。

本稿では、ある計画を実施した際の危険性を、起こりうる最悪事象の危険性と考え、起こりうる最大の状態値から評価することとする。この際、全ての構造物の

うち最も危険な構造物の状態値の確率分布を元に、起こりうる最大の状態値を推定することで、管理者が計画の危険性を評価するものとし、その評価手法について検討する。

(2) 用いる評価手法に関する検討

ここでは、前節で議論された、全ての構造物のうち最も危険な構造物の状態値の確率分布の性質の違いを捉えて、計画の危険性を評価する手法について検討する。前述のとおり、全ての構造物のうち最も危険な構造物の状態値の確率分布を元に、起こりうる最大の状態値を推定することを目的とする。

そこで、管理者が保有する全ての構造物のうち、最も危険な構造物の状態値の確率分布について、100,000回のモンテカルロ・シミュレーションを実施した上で

求めた 99.9%分位点を参考のリスク値とし、その参考のリスク値に近い評価ができていくという観点から各リスク尺度を比較する。比較に際しては次のようなケースを用いる。

管理者が $t = 2, 4, 6, 8, 10$ において、 $B_t = 2500$ 、 $\beta = 0.15$ で維持管理を実行した場合の $t = 12, 14, 16$ における行動を $t = 0$ 時点から計画するという状況を想定する。

ここでは簡単のため、(a) 目視点検を行い、残りすべての予算を補修にかける場合、(b) コストはかかるが高精度な点検を実施し、残りの予算で補修を行う場合の 2 つの行動から管理者が行動を選択すると仮定した。 $t = 12, 14, 16$ の各時点で $(B_t, \beta) = (2500, 0.15)$ 、 $(1500, 0.08)$ のいずれかを選択するものとした。前者が行動 a、後者が行動 b に該当する。

参考のため図-5 に $t = 12$ 時点で、行動 a, b をとった場合の最も危険性の高い施設の状態量の超過確率分布を示す。

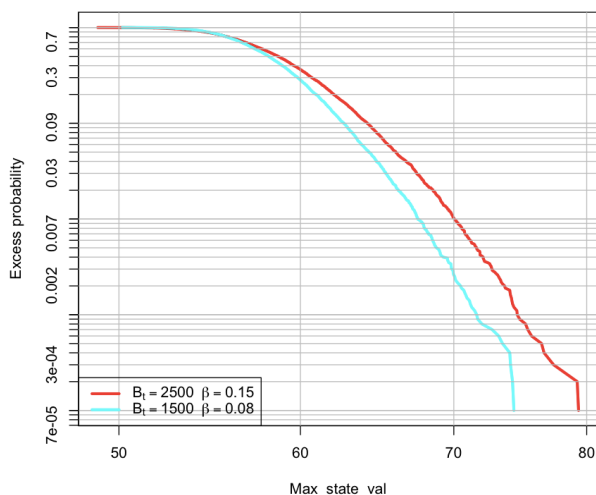


図-5 最も危険な構造物の状態値の経験超過確率分布 (行動 a, b の $t = 12$ における比較)

図-5 より、行動 a の方が、点検誤差幅が大きいため確率分布の Tail 部が厚くなっている事が分かる。

リスク尺度として、coherent 性を満たす、Mean-Semideviation(式 (1))、CVaR(式 (2))、EVaR(式 (3)) の 3 つについて検討した。ただし、Mean-Semideviation については $\lambda=0, 1$ の 2 ケース、CVaR ならびに EVaR については $\alpha=0.95, 0.99$ の 2 ケースについてそれぞれ調べた。ただし、以下では Mean-Semideviation の $\lambda = 0$ のケースは平均値、 $\lambda = 1$ のケースは Mean-Semideviation と記す。

各時点 $t = 12, 14, 16$ におけるリスク評価値の妥当性を検証する。 $t = 12$ について、全ての構造物の中で、最も危険な構造物の状態値の確率分布を各リスク尺度を用いて評価したリスク値について、行動 a を選んだ場

合のリスク値に対する行動 b を選んだ場合のリスク値の比を表-2 に示す。

表-2 $t = 12$ 時点での各リスク尺度による評価値と 99.9%分位点との関係

リスク尺度	b のリスク値/a のリスク値
99.9%分位点	0.962
平均値	0.990
Mean-Semideviation	0.990
CVaR _{0.95}	0.971
CVaR _{0.99}	0.966
EVaR _{0.95}	0.967
EVaR _{0.99}	0.962

非常に希なリスクをどの程度評価できるかという観点からいえば、リスクメジャーが与える比が、99.9%分位点の与える比に近いことが好ましいということになる。

また $t = 14$ について、a-a、a-b、b-a、b-b の 4 種類の行動について、全ての構造物の中で最も危険な構造物の状態値の確率分布をリスク尺度で評価したリスク値について、各リスク尺度毎に、行動 a-a を実施した場合のリスク値に対する各行動を実施した場合のリスク値の比を調べた。各行動毎に、横軸に参考のリスク値である 99.9%分位点の値、縦軸に各リスク尺度による評価値をプロットしたものを図-6 に示す。

同様に、 $t = 16$ について、8 種類の行動について、行動 a-a-a を選んだ場合のリスク値に対する他のリスク値の比を調べ、99.9%分位点の値とリスク尺度による評価値との関係を図-7 に示した。

図中の黒直線はいずれも原点を通る傾き 1 の直線を示し、この直線に近いほど、縦軸に示したリスク評価値が、横軸に示す参考とするリスク値に近いことを示す。

いずれにおいても、平均値や Mean-Semideviation では、確率分布の Tail 部が厚くなる場合の危険性を適切に評価できていない。また CVaR と EVaR について同じ α の値の場合を比べると、EVaR の方がより参考とするリスク値、すなわち図中で直線に近づいていることが分かる。また同じリスク尺度内で α の違う場合について比較すると、 α が大きいほど、直線に近づいており、参考とするリスク値に近い評価がなされていることが分かる。このように、大澤ら⁶⁾で確認されたように、CVaR よりも EVaR の方がロバストにその危険性を評価できている。

以上より、起きうる事象の最大値を低減させる場合には、CVaR や EVaR などの Tail 部の形状に基づき危険性を評価するリスク尺度を用いた上で、より大きな α について評価することが適切であると分かった。

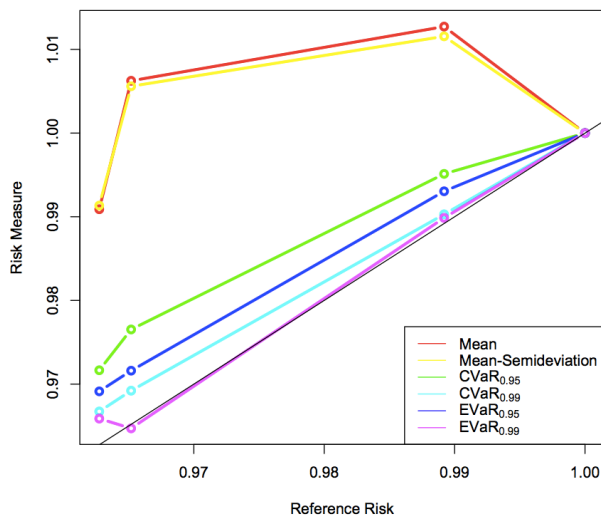


図-6 $t = 14$ 時点での各リスク尺度による評価値と 99.9%分位点との関係

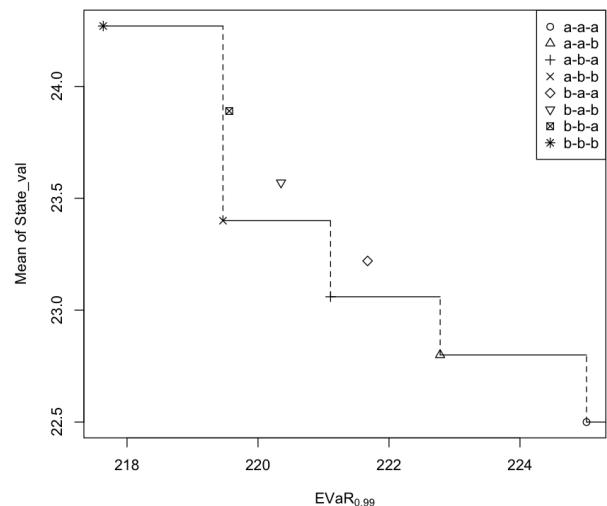


図-8 各計画の予算の充足性と危険性

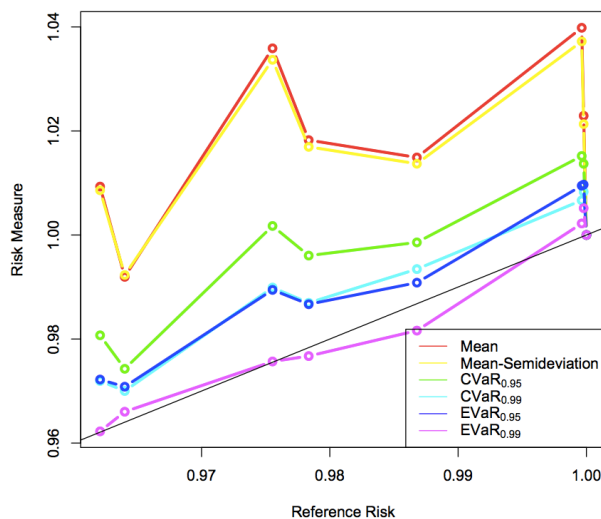


図-7 $t = 16$ 時点での各リスク尺度による評価値と 99.9%分位点との関係

(3) 予算の充足性と危険性との関係

先に述べたとおり、予算の充足性については、管理者が保有する構造物群の状態値の平均値を用いて評価する。これと $\text{EVaR}_{0.99}$ による評価値から、各計画の予算の充足性と危険性との関係を図-8に示す。実線は、あるリスク制約の下での、最適な計画群を示す。例えば、 $\text{EVaR}_{0.99} \leq 220$ となる最適な計画は、a-b-bと求まる。

今回のケースでは、 $t = 14, 16$ の行動が同じであれば、 $t = 12$ で行動 a を取ったケースの方が、より望ましい計画となっている事が分かる。管理者は自身が目指す管理水準とリスク削減を考慮して、これらの最適な計画の集合から意思決定することとなる。

6. まとめ

本研究では、管理者行動が、維持管理計画のリスクカーブの性質の変化に及ぼす影響を考慮して、維持管理計画を策定する手法を提案することを目的とした。

まず、管理者行動に伴うリスクカーブの性質の変化は、確率密度関数の Tail 部の形状に基づき危険性を評価する CVaR や EVaR などのリスク尺度を用いることで、計画策定においても考慮可能だと確認された。

その上で、提案した手法を用いて、予算の充足性と事故に繋がり得る危険性から、最適な計画群が求まることが示された。

今後の課題として、最適な計画群を求めるための最適化手法が挙げられる。具体的には、遺伝的アルゴリズムなどの利用についての検討が必要である。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 26630237 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 実践的アセットマネジメントと第2世代研究への展望, 土木技術者実践論文集, Vol.1 pp.67-82, 2010.
- 2) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772, pp.169-184, 2004.
- 3) 田村謙介: 予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール, 土木計画学研究論文集, Vol.19, Issue.1, pp.71-82, 2002.
- 4) Seyedshohadaie, S.R., Damjanovic, I., and Butenko, S.: Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.44, Issue.4, pp.236-248, 2010.
- 5) 坂井康人, 慈道充, 貝戸清之: 都市高速道路のアセットマネジメントーリスク評価と財務分析, 建設マネジメント研究論文集, No.16, pp.71-82, 2009.
- 6) 大澤遼一, 本田利器: 管理者行動の影響を考慮したインフ

- ラ維持管理計画におけるリスク定量化, 土木学会論文集 A2, Vol.17(特集), 2014.(投稿中)
- 7) 小池武: リスクマネジメント手法によるパイプラインの維持管理戦略について, 土木学会論文集, No.794, pp.189–202, 2005.
 - 8) Smilowitz, K., and Madanat, S.: Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.15, Issue.1, pp.5–13, 2000.
 - 9) Liu, M., and Frangopol, D.M.: Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost, *Journal of Structural Engineering* Vol.131, Issue.5, pp.833–842, 2005.
 - 10) Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J.M., and Heath, D.: Coherent measures of risk, *Mathematical finance*, Vol.9, issue.3, pp.203–228, 1999.
 - 11) Ogryczak, W., and Ruszczyński, A.: From stochastic dominance to mean-risk models: Semideviations as Risk Measures, *European Journal of Operational Research*, Vol.116, Issue.1, pp.33–50, 1999.
 - 12) Rockafellar, R. T., and Uryasev, S.: Optimization of conditional value-at-risk, *Journal of risk*, Vol.2, pp.21–42, 2000.
 - 13) Ahmadi-Javid, A.: An information-theoretic approach to constructing coherent risk measures. *Information Theory Proceedings (ISIT), IEEE International Symposium on IEEE*, pp.2125–2127, 2011.
 - 14) 枇々木規雄: 多期間ポートフォリオ最適化問題のための数理計画モデル, 第 12 回 RAMP シンポジウム予稿集, pp.95–106, 2000.
 - 15) Di Nunno, J., and Øksendal, B.: *Advanced mathematical methods for finance*, Springer, 2011.
 - 16) Ruszczyński, A.: Risk-averse dynamic programming for Markov decision processes, *Mathematical programming*, Vol.125, Issue.2, pp.235–261.
 - 17) Chow, Y. L., and Pavone, M.: Stochastic optimal control with dynamic, time-consistent risk constraints, *In American Control Conference (ACC)*, pp. 390–395, 2013.
 - 18) Frangopol, D.M., Kong, J.S., and Gharaibeh, E.S.: Reliability-based life-cycle management of highway bridges, *Journal of computing in civil engineering*, Vol.15, Issue.1, pp.27–34, 2001.
 - 19) Ouyang, Y., and Madanat, S.: Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.38, Issue.5, pp.347–365, 2004.
 - 20) Phares, B.M., Washer, G.A., Rolander, D.D., Graybeal, B.A., and Moore, M.: Routine highway bridge inspection condition documentation accuracy and reliability, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.9, Issue.4, pp.403–413, 2004.
 - 21) Madanat, S., and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation science*, Vol.28, Issue.1, pp.55–62, 1994.

(2014. 8. 1 受付)