

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630237

研究課題名(和文) 情報理論により確率特性の不確実性を考慮したインフラ維持管理計画のためのリスク評価

研究課題名(英文) Risk quantification based on information theoretic approach for infrastructure maintenance policy

研究代表者

本田 利器 (Honda, Riki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：60301248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：維持管理の合理的な意思決定に資するため、インフラの価値や維持管理コストの確率的性質に不確実性があることを考慮したリスク評価する手法が求められている。本研究では、数値モデル解析により、点検結果に基づく補修優先順位付けなどの管理者行動等の影響で、確率密度関数のテイルが厚くすることを示し、その影響を捉えたリスク評価として、情報量の考え方をを用いた評価であるEntropic Value at Riskの有効性を示した。また、このような評価指標を、維持管理という逐次的な意思決定を行う過程に適用する際に問題となる、時間的不整合性および計算時間の指数的増加という課題に対処する数値解析法を開発した。

研究成果の概要(英文)：For efficient maintenance of infrastructure, it is essential to estimate risk, considering the uncertainty of stochastic property of state value of infrastructure and maintenance cost. Numerical simulation showed that due to the effect of maintenance activities, such as prioritization of repair of damage, tail part of the probability density function can gain thickness. It was found that Entropic Value at Risk, an information theoretic risk measure, can appropriately evaluate risk of such situation. When these risk measures are applied to time series events such as maintenance of infrastructure, they cause difficulty of time inconsistency and exponential increase of computational cost. Methods to manage these difficulties are also developed.

研究分野：社会基盤学

キーワード：インフラ維持管理 リスク定量化 管理者行動 繰り返しリスク指標 情報量

## 1. 研究開始当初の背景

先進国では、各種土木構造物(以下インフラ)の高齢化に伴う維持管理の必要性が高まっている。一方、政府の予算逼迫のため、インフラの維持管理や更新にかけることが出来る費用は減少しており、適切な予算を確保する重要性は増している。そこで、長期的に合理的な投資を計画し、更に利用者や納税者への説明責任を果たすことを目的としたアセットマネジメント(AM)の実施が目指されている<sup>1)</sup>。

AMでは、長期的なコスト低減という効率性と、危険な事象、すなわち社会的に影響の大きな事象の発生可能性を低減するリスクマネジメントの両立を目指すこととなる。

リスク低減については、2007年のミネアポリスにおける橋梁崩落事故や、2013年の笹子トンネル天井板落下事故などのようなインフラ事故は直接的な影響も大きい、何よりも社会的な影響が大きく、回避することが強く求められている。笹子トンネル天井板崩落事故をはじめ、コンクリート片剥落などの事故は、構造物の平均的な状態が良いものであっても、構造部材のうち性能が低下した箇所があれば、そこで生じる稀な事象である。このような発生頻度は小さいが影響が大きい事象の発生を防ぐことは、社会インフラを管理する管理者にとって重要である。

維持管理にかけることが出来る予算が潤沢にあり、構造物全体の性能が高く維持されていれば、効率性の向上を目指すことが、劣化損傷が発生するリスクの低減にも有効である。しかし、今後、維持管理に費やすことの出来る予算が減少することが現実視されている。維持管理にかけることが出来る予算が潤沢でない場合、長期的な効率性の向上に資する施策と、直近のリスク低減に資する施策とが競合することが懸念される。この際、効率性の向上とリスクの低減について、それぞれをどの程度重視するべきか(予算を配分すべきか)を決めるためには、リスクの低減を合理的に考慮する必要がある。

インフラの維持管理においては、LCC(ライフサイクルコスト)の最小化<sup>2)</sup>は重要である。しかし、劣化の高精度な予測は困難であるため、実際には、点検調査にもとづき逐次修繕を進めるというリスクマネジメントも不可欠である。インフラの劣化を精度良く推定することは困難であることを考慮すると、これは合理的な方法であるといえる。しかし、これは、LCC等の長期的な予測はますます大きい誤差を含まざるをえないことを示唆する。劣化現象自体の不確実性に加え、メンテナンス行為は、様々な意思決定を含むため、見落としや不十分な補修等不確実性の要素を有する。これらの不確実性は、正規分布や対数正規分布等の固定された確率特性を想定した確率的手法で考慮されることも多いが、実際には、確率的な特性が想定とは異なる事も少なくない。

これらの不確実性がリスクに及ぼす影響について、点検誤差の大きさの変化による影響については既往の研究<sup>3)</sup>もある。ただし、期待コストの観点から定量化を行なっているものであり、リスクの性質自体に及ぼす影響は明らかではない。

したがって、インフラの維持管理計画の策定においては、事象の確率的特性を考慮するだけでは無く、確率的特性自体の変化を考慮することが必要になる。

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、本研究では、インフラの状態量の変化が、劣化という物理的な現象に加えて、管理という社会的な因子の及ぼす影響を受けることを踏まえたうえで、テイルリスクと言われる「稀だが影響が大きな事象」の発生を考慮したリスクの定量化手法を開発することを主たる目的とする。

そのために、管理者が実施する維持管理行動の影響を考慮した劣化プロセスを確率過程としてモデル化し、管理戦略の変更がリスクの確率的な性質に及ぼす影響を明らかにする。逐次的な意思決定に基づいて実施される行動であるという点に着目し、その影響を明らかにする。

その上で、管理者行動の影響を考慮した場合における、インフラ維持管理で用いるリスク定量化手法の開発を行う。

また、そのような数値解析は、時間ステップ数や選択肢の数の増加に伴い、指数関数的に計算量が増加するといういわゆる「次元の呪い」が生じ、現実的には解けない問題となる。これを回避した実用性のある計算手法の開発も目的とする。

## 3. 研究の方法

## (1) 管理行動の影響を考慮した劣化プロセスのモデル化

管理者の維持管理行動がリスクに及ぼす影響の考慮である。従来のLCC最適化による維持管理戦略では、補修などの対策実施の優先順位付けも効率性の観点で実施されていることになる。

しかし、実際の現場では、技術者が危険性などを総合的に考慮し経験的な優先順位付けを行っている。また、それに加えて、管理者行動に内在する複数の不確実性が存在する。代表的なものとして、点検の不確実性と劣化予測の不確実性が挙げられる。たとえば、多くの構造物に適用されている目視点検や非破壊検査には誤差があることが指摘されている。また、劣化予測について、構造工学的・統計学的なアプローチから様々な劣化予測手法が提案されているものの参考となるデータが十分に無く、依然として不確実性が多く残っている。これらの不確実性も維持管理においてリ

スク低減を目指す際に考慮する必要がある。

以上の点を踏まえ、インフラ構造物の劣化をシミュレートする数値解析モデルを構築する。代表的なインフラ構造物として道路橋梁を想定する。代表的な構成部材として橋梁床版をとりあげ、複数の橋梁床版で構成された構造物を維持管理の対象とする。

管理者による維持管理についても数値解析モデルを構築する。点検について、コンクリート内部の劣化などは目視点検では、部材や部位によっては、劣化が進行してからでないと発見できないことなどがしばしば指摘される。このような不確実性をモデル化したシミュレーションモデルを構築する。たとえば、発見しづらい損傷が存在する場合、ある構造物に発生した劣化が、点検により発見されやすいかどうかや構造物や損傷種類ごとに異なるという状況を考慮する。この場合、点検誤差の大きさが異なることに加え、発見しにくいものは長期間看過される可能性が高いことになる。

これらのような劣化という物理的事象と点検管理という社会的行動の両者の影響を考慮して劣化プロセスをあわせた数値モデルを用いて長期的な構造物の状態量の確率的な特性の変化を把握する。

## (2) テイルリスクに着目したリスク指標

重大事象の発生を考慮する場合、重大事象に繋がるような、悪い状態の発生する確率が問題となる。このような確率密度関数の低頻度な部分は、テイル (裾) と言われる。たとえば、テイル部が厚くなる場合、状態値の期待値があまり悪くない場合でも、非常に危険な状態が生じる可能性が無視できない。このテイル部の特性の変化を把握して定量化することが必要となる。

リスク定量化の指標として、古典的なリスク評価で用いられてきた期待値や分散などの低次モーメントを利用した指標や、テイル部の危険性を考慮するために、超過確率がある値 (例えば 1%) となる量について評価する Value at Risk (VaR)、テイル部への感度を高め、コヒーレント性を持たせるなど数学的な性質も改善した指標である Conditional Value at Risk (CVaR) 等に加えて、情報量の考え方を反映させた指標を検討する。具体的には、Entropic Value at Risk (EVAR)<sup>4)</sup> の適用性を検討する。

## (3) 動学的性質に着目したリスク指標

従来のリスク指標を多期間へと拡張した動的リスク指標を定義する。動的リスク指標には、時間的整合性が求められる。これは、現在の意思決定と将来の意思決定との間に齟齬が生じないということである。つまり、将来の時に優位と評価されることになる戦略を、過去の時点 (現在) においても優位と評価

することができるということである。この性質は、リスクとしてコスト期待値を用いる場合には問題とならないため、従来の理論体系ではあまり問題とならなかった。しかし、本研究で考慮するリスク指標を考える場合は不可欠である。

維持管理では、年度毎などのコストやリスクの分布を、ある指標で評価した値を踏まえて、予算やその配分が決定される。つまり、この意思決定は離散的な時点においてなされることになるため、離散時間を考えて定式化する。

時間的整合性を有するリスク指標の考え方としては、繰り返しリスク指標<sup>4)</sup>が挙げられる。これは1期間リスク指標を再帰的に繰り返し用いて定義されるリスク指標である。本研究ではこの考え方に基づくリスク評価指標を設定した。

提案した指標を維持管理戦略の有するリスクを評価する指標としての有効性を検証する。そのほかの一般的なリスク指標との性能の評価を行う。

## (4) 維持管理戦略政策評価のための数値解析手法の開発

上述した動学的なリスク指標を用いて維持管理戦略を評価するための数値解析手法の構築を行う。

維持管理の動学的問題を解く場合、部分観測マルコフ決定過程として定式化し、ベルマン方程式を解くことが多い。しかし、状態数等の組合せや、更にそこから構成される信念の状態量の組合せを考えると、構造物群の全体が取りうる状態の組合せは、指数的に増加し、膨大なものとなるため、実用的ではなくなる。

このような問題に対して、コストの期待値を考慮する場合の方法論としては、様々な手法が提案されている。特に、非ガウス性や非線形性を考慮した手法としては粒子法が広く用いられている。しかし、テイルの定量化には、従来の期待値の定量化に比べて、はるかに多くの計算量が必要となる。また、確率の値に応じたリサンプリングをおこなうと、低頻度なテイルを評価することができなくなるという本質的な課題がある。そこで、テイル部を効率良く数値解析するため、各時間ステップにおける粒子のリサンプリングにおいて、クラスタリングを組み合わせたアルゴリズムを開発し、その有効性を確認する。

また、提案された手法を用いて、仮想的なシミュレーションモデルを用いて維持管理政策の比較検討を実施する。

## 4. 研究成果

(1) 管理行動の影響を考慮した劣化プロセスの確率的特性

構築した数値モデルを用いて、パラメトリックスタディーを行い、様々な因子が、構造物の状態量の確率的な特性に与える影響を分析した。

劣化した構造物の補修や更新に用いる予算が減額されると、構造物群のなかで最も悪い状態にある構造物の状態値や、深刻な損傷が発生する確率等に関する超過確率分布は全体として危険側にシフトするのに対して、管理者行動の介入、特に点検精度の変化や点検間の相関の大きさ（見逃しの連鎖の発生可能性の上昇）に伴い、低頻度事象の発生確率にあたるリスクのテイル部の厚みが増加し、状態が悪化した構造物の発生可能性が変化することが示された。

このような低頻度事象のリスクの変化は、古典的なリスク指標では把握しにくい事象である。しかし、深刻な事故を防ぐというリスク回避的な方針をとるためには、この点を定量的に評価した上で計画策定を行う必要があり、そのための手法が必要である。

## (2) テイルリスクに着目したリスクの定量化指標

数値シミュレーションにより、テイル部のリスクの変化を把握することの必要性が明らかになった。これを踏まえ、期待値、平均+上半標準偏差、VaR、CVaR、EVaRの5種を、上記のシミュレーション結果に適用して、インフラの維持管理におけるテイルリスクを定量化する手法としての有用性を比較した。

結果の一例を図1に示す。図では、横軸に、深刻な事態を回避するという維持管理の観点からのリスクの大きさを示し、縦軸に、それぞれの事態におけるリスク指標の値をプロットしている。単調に右上がりとなることがリスク指標として好ましいことを意味する。

傾向としてはいずれのリスク指標も右上がりの傾向を示したが、EVaR以外の指標では、一部で単調な増加とならない場所も見られた。

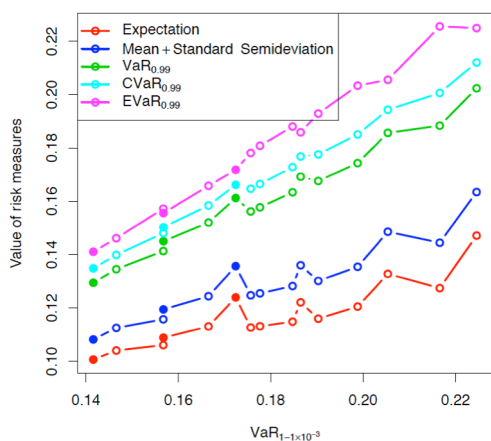


図1 リスク指標と状態の深刻さの関係

この結果は、管理者行動の影響が介在するインフラ維持管理のリスク定量化において、非常に影響が大きな事象の発生可能性まで考慮してリスクを定量化する際には、EVaRのように、情報エントロピーの概念を用いて、確率分布のテイル部の形状を考慮してリスクを定量化することが望ましいことを示唆するものである。ただし、EVaRにおいても、どのような状況でも完全に右上がりでも評価できるものではない。（そのような指標は原理的に不可能である。）

数値例を用いて評価手法の検討結果は、情報エントロピーの概念を用いたEVaRを用いることの有用性を示す結果となったが、CVaRもある程度の実用性を示した。また、実用性を考慮する上では、従来の最適化の目的関数である、期待LCC最小化などと合わせた利用方法の検討などの課題も認識された。

## (3) 動学的問題におけるリスク指標

インフラの維持管理は時間的な変化を伴う事象であるため、一期を対象とするリスク指標を用いた場合には時間不整合の問題が生じうる。これを踏まえ、時間的整合性を有するリスク指標として、繰り返しリスク指標<sup>4)</sup>の考え方に基づく評価を提案した。ここではその有効性を検討するため、インフラ維持管理の問題を模した数値解析を実施した。

管理者はよりリスクが低い施策を実行すると考えられる。リスクとしては、発生しうる被害額の期待値という評価と、被害額のテイル値による評価の2つが考えられる。施設を平均的に良い状態に保つときには、被害額の期待値を最小化するように維持管理を実施することになる。一方、非常に大きな事故の発生を回避するという観点では、被害額の確率分布のテイル値の評価が重要となる。そのため、CVaRなどのリスク指標の評価値を最小にするよう維持管理を実施することになる。そこで、数値シミュレーションでは、実用性も考慮して、双方の視点を考慮し、リスク指標として被害額の期待値とCVaRとの線形和を用いた解析も行った。

一般的にリスク指標を用いた場合、当初時点において、将来の合理的な意思決定を適切に考慮できないため、効率性が低下した。一方、繰り返しリスク指標が時間的整合性を有する指標であり、逐次的な過程である維持管理計画のリスク評価に適用しても、計画時点で将来のリスクの再評価を考慮した計画策定が出来るということが示された。

また、各時点でのリスクの実現値を比較した時、繰り返しリスク指標を用いて策定された計画に従うことで、非逐次的なリスク指標に従い維持管理を行った場合に比べ、各時点でのリスクを低減出来ることが分かった。この差は計画期間が長くなるほど、大きくなることも示された。

#### (4) 計算量を減じた数値解析手法

動的最適化問題を数値シミュレーションで得場合に、計算量が膨大になってしまうという課題を解決するための手法として、粒子法をベースに、クラスタリングと粒子フィルタにおけるリサンプリングとを組み合わせた手法を開発した。提案手法では、発生確率に応じて重みの異なる粒子で確率分布を表現する。また、次時点のシミュレーションを行う際に、発生確率に基づいてリサンプリングを行うとテイル部の精度が低下してしまうという問題を回避するため、クラスタリングを用いて、粒子の分布する空間を把握することで低頻度事象の存在を把握できるようにする。

本研究では、大規模なモンテカルロシミュレーションと提案手法を用いて、インフラの劣化シミュレーションを実施した。得られた結果を比較することで、提案手法が、期待値と同程度の精度でリスクを定量化できていることが確認できた。

また、繰り返しリスク指標を用いた維持管理を行った場合のインフラ維持管理の複数期間にわたる計画策定問題に適用した。その結果、動学性を有するリスク指標である繰り返しリスク指標を用いることで、適切に、稀だが影響が大きな事象を回避した計画が策定できていることを確認した。

#### <主な引用文献>

- 1) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.27, Issue.6, pp.425-438, 1993.
- 2) Frangopol, D. M., & Liu, M. (2007). Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost. Structure and infrastructure engineering, 3 (1), 29-41.
- 3) Ahmadi-Javid, A. (2011). Entropic Value-at-Risk: A New Coherent Risk Measure. Journal of Optimization, Theory and Applications, 155 (3), 1105--1123.
- 4) T. Osogami,(2012). Iterated risk measures for risk-sensitive Markov decision processes with discounted cost, arXiv preprint arXiv:1202.3755.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 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におけるリスク評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 特集号, Vol. 71 No. 5 (土木計画学研究・論文集 32 巻), p. I\_151 - I\_161,

2015,  
DOI:10.2208/jscejipm.71.I\_151

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① Ryoichi Osawa, Riki Honda: Risk quantification for life-cycle management of infrastructure considering the effect of maintenance behavior, Proceedings of Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), TU Delft, Delft, The Netherlands, October 16-19, 2016.
- ② 大澤遼一・本田利器: 動学的性質を考慮したインフラ維持管理におけるテイルリスク定量化, 53-06, 第 53 回土木計画学研究発表会 (北海道大学), 平成 28 年 5 月 28-29 日, 2016
- ③ 大澤遼一・本田利器: インフラ維持管理における動学的なリスク考慮のための基礎的検討土木計画学会, 第 51 回土木計画学研究発表会 (春大会), 九州大学伊都キャンパス, 2015 年 6 月 6 日(土)-7 日(日)
- ④ 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の策定, 第 50 回土木計画学研究発表会, 鳥取大学, 鳥取県鳥取市, 2014 年 11 月 1-3 日.
- ⑤ 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の危険性評価, 土木学会, 平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術講演会, VI-180, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, 2014 年 9 月 10-12 日.
- 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の危険性評価, 第 17 回応用力学シンポジウム, 琉球大学千原キャンパス, 沖縄県中頭郡西原町, 2014 年 5 月 10-11 日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

本田 利器 (HONDA, Riki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 60301248