

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

東京大学 学生会員 ○大澤遼一
東京大学 正会員 本田利器

1. はじめに

筐子トンネル天井板落下事故をはじめとした構造物の崩壊や第三者被害発生等のインフラ事故の発生と今後の事故発生数増加の予見を受け、インフラ維持管理において、ライフサイクルコスト最小化を目指す効率性の観点だけでなく、インフラ事故の発生を防ぐ等の危険性を低減する重要性が高まっている。

インフラ事故リスクの削減においては、事故リスクを定量化した上で対策を選択することになる。従来のインフラ維持管理の意思決定理論は期待ライフサイクルコストの最小化を目指すものであるため、この枠組で事故リスクを考慮すれば、事故による期待被害額等、事故リスクの期待値の最小化¹⁾を目指すものとなる。しかし、事故リスクマネジメントにおいては低頻度だが深刻な事象の発生を防止するという視点が求められる。こうした視点を考慮した危険性評価手法が必要であるが、評価手法の要件は明らかではない。

また、経年劣化を考慮したインフラの状態量の予測については幅広い知見がある。一方で、劣化損傷の見逃しや点検時の測定誤差などの不確実性が、維持管理という動的な過程を通してインフラの状態量やその危険性に及ぼす影響は分析されていない。危険性評価手法を検討する上で、維持管理における不確実性に伴う事故発生確率の変化を把握する必要がある。

本研究では、インフラの劣化過程において、管理者行動の不確実性が及ぼす影響を把握した上で、維持管理計画の危険性評価手法を提案することを目的とする。

2. 管理者行動の影響の分析

(1) 数値シミュレーションモデル

維持管理における管理者行動の不確実性がインフラの状態量やその危険性に及ぼす影響を分析するために、次のような数値シミュレーションモデルを作成した。

複数の同質な施設(インフラ)が存在すると仮定し、それぞれの t 年後の各施設の劣化状態を連続量 $x(t) \in [0, 1]$ で表す。これらは式1に示すように確率的なマルコフ過程であるとし、NY市の橋梁床版の劣化データ²⁾を参考に劣化関数を定めた。

$$x(t+1) = x(t) \exp(-a\xi) \quad (1)$$

ξ は、切断点が s となる切断対数正規分布 $\text{LN}(\mu, \sigma, s)$ に従う確率変数である。

管理者行動としては、予算制約下で優先順位をつけて補修している実際の現場での意思決定を参考に、点検の結果に基づき危険性の高い施設から順に、予算が許す範囲内で補修を行うものとした。補修は状態量を最大値($x(t) = 1.0$)まで回復することとした。また、点検における測定誤差と見逃しの存在を仮定した。測定誤差としては、観測値が状態量に対してある確率分布に従いばらつく事象を想定した。また、点検の見逃しとして、ある確率で観測値が更新されない事象を想定した。

このモデルに基づき、複数施設の状態量の確率分布をモンテカルロ・シミュレーションを用いて求めた。管理者行動の不確実性を規定する複数のパラメータを変化させ、影響を分析した。

(2) 数値シミュレーションの結果と考察

ここでは事故に繋がる事象の発生確率を検討するために、管理者が所有する施設のうち、最も危険な施設の状態量、すなわち状態量が最も低い施設に着目し、その状態量の50年後の値に基づき維持管理計画の危険性を評価することとした。すなわち、施設の状態量のうちの最低値に着目し、その経験累積分布を求めた。Case 1は管理者行動に不確実性がないとした基本ケースである。Case 1に対して予算が20%減少したCase 2を用いて予算減少の影響を調べた。また、Case 3は点検の見逃しがあるとして、確率0.04で観測値の更新がなされないとしたケースである。

それぞれのケースのシミュレーション結果を図-1に示す。ここでは、経験累積分布を両対数グラフにプロットした。

予算が減少したCase 2においては、累積分布が平行移動して状態量が低い事象の発生確率が高まっているが、分布形状はCase 1とほぼ同様のものとなっている。一方、点検の見逃しを仮定したCase 3のように、管理者行動の不確実性が介在する場合には、累積分布関数が両対数グラフ上で直線に近づくという形で、状態量が低い事象の発生確率が高まっている。これは、管理者行動の不確実性が蓄積されることで、状態量が低い事象の発生確率が、べき分布というfat tail性を有する分布に近づいていることを示す。その結果Case 2と比べCase 3では、低頻度で状態量が低い事象の発生確率が著しく高くなっている。

Key Words: 維持管理, fat tail, リスク指標, 情報エントロピー

連絡先: 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 Tel 04-7136-5884/ Fax 04-7136-4742

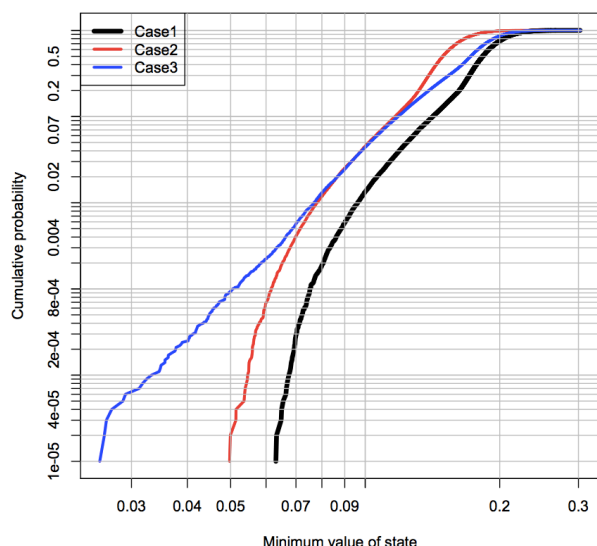


図-1 状態量の最低値の経験累積分布

そのため、確率分布から状態の危険性を比較する際に、発生確率が中程度までの事象が大きく寄与する期待値や分散などを用いると、事象の危険性を適切に比較できない。

3. 危険性評価手法の検討

(1) Entropic Value at Risk

前節の結果より、計画の危険性評価においては、発生確率が中程度までの事象が大きく寄与する評価手法ではなく、fat tail 性に伴う低頻度事象の発生確率の変化を捉えた評価である必要があると分かった。

低頻度事象の発生確率の変化を考慮して危険性を評価する手法としては、金融工学で用いられる、累積確率が α ($\in [0, 1]$) となる値を用いて評価を行う Value at Risk (VaR, 式 2) や、積分値を用いて累積確率 α 以下の確率密度関数の形状を考慮した評価を行う Conditional VaR (式 3) があるが、いずれも fat tail 性を完全に捉えられるものではない。

$$\text{VaR}_\alpha(X) = -\inf_{t \in \mathbb{R}} \{t : F(x) \geq \alpha\} \quad (2)$$

$$\text{CVaR}_\alpha(X) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \text{VaR}_t(X) dt \quad (3)$$

本研究ではこれらに対して、情報エントロピーの考え方に基づくリスク指標である、Entropic VaR (式 4)³⁾ の優位性を検討した。

$$\text{EVaR}_\alpha(X) = -\inf_{Q \ll P, D_{KL}(Q \| P) \leq -\ln \alpha} E_Q[X] \quad (4)$$

式 4 の Q は、母集合 P と絶対連続な確率集合、かつ P に対する確率空間上での距離 (Kullback Leibler Divergence, $D_{KL}(Q \| P)$) がある一定の値以下となるもののうち、 X の期待値が最小となる集合を指す。確率密度関数の tail 部分が「平坦」に近い ($\equiv$ 「低頻度事象の発生確率が大きい」) 程、確率空間上での距離 D_{KL} は大きくなる

ため、 Q に含まれる事象が少なくなり、 $E_Q[X]$ は小さくなる。従って、EVaR は低頻度事象の発生確率を「平坦さ」という尺度で考慮した指標と解釈できる。

(2) 維持管理計画の危険性評価の精度

表-1 リスク評価指標による Case 1 との評価値の差 (値が大きいくほど危険性大)

指標	Case 2	Case 3
平均値	3.30×10^{-2}	1.45×10^{-2}
平均値 - 下半標準偏差	3.12×10^{-2}	1.66×10^{-2}
$\text{VaR}_{0.1}$	2.49×10^{-2}	2.32×10^{-2}
$\text{CVaR}_{0.1}$	2.15×10^{-2}	2.14×10^{-2}
$\text{EVaR}_{0.1}$	1.98×10^{-2}	2.16×10^{-2}
$\text{VaR}_{0.05}$	2.22×10^{-2}	2.15×10^{-2}
$\text{CVaR}_{0.05}$	1.96×10^{-2}	2.05×10^{-2}
$\text{EVaR}_{0.05}$	1.81×10^{-2}	2.23×10^{-2}

図-1 に示した 3 つのケースに適用した結果を表-1 に示す。Case 1 から Case 3 にかけて順に危険性は大きくなるが、平均値や下半標準偏差を用いた評価では Case 3 の危険性を大きく過小評価していることが分かる。また $\text{VaR}_{0.05}$ と $\text{VaR}_{0.1}$ による評価では Case 2 より Case 3 の方が危険性が低いと評価されることが分かる。また、 $\text{CVaR}_{0.1}$ でも同様に Case 3 の危険性が過小評価されている。一方、EVaR はいずれにおいても危険性を適正に評価できている。

こうした結果から、EVaR は他の 2 指標に比べ、同じ累積確率 α について評価した時、より高精度に fat tail 性に伴う低頻度事象の発生確率の変化を捉えて危険性を評価可能であることが分かった。

4. おわりに

本研究では、管理者行動の不確実性の影響を把握した上で、維持管理計画の危険性評価手法を提案することを目的とした。まず、管理者行動の不確実性により、状態量の最低値の発生確率は fat tail 性を有する分布に近づくことが分かった。そして情報エントロピーを用いたリスク指標である EVaR は既往のリスク指標に比べ、より高精度にこうした fat tail 性に伴う低頻度事象の発生確率の変化を捉えて危険性を評価可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 貝戸清之, 小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, No.63, Vol.2, pp.336-355, 2007.
- 3) Ahmadi-Javid, A.: Entropic value-at-risk: A new coherent risk measure, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.155, Issue.3, pp.1105-1123, 2012.