

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04330

研究課題名（和文）人工知能技術を援用した道路ネットワーク構造物群の維持管理技術の開発

研究課題名（英文）Development of maintenance management technology for road network structures using artificial intelligence technology

研究代表者

丸山 収（Maruyama, Osamu）

東京都市大学・建築都市デザイン学部・教授

研究者番号：50209699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ネットワーク構造系を対象として、社会基盤施設群を、包括的に維持管理する戦略について検討することを目的としている。個々の社会基盤施設の健全度および将来の劣化状態を予測し、施設群をポートフォリオとして捉え、本来果たすべき機能に対して、物理的損失、機能的損失を考慮して、予算制約などの条件下で効率的な予算配分を行う実務的な戦略を構築する。点検データに確率微分方程式を用いて、トンネル構造物の近未来劣化予測および補修戦略の策定のための理論開発を行った。空間的に広がりのある構造系のポートフォリオリスクを評価する際に、相関を考慮する手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、構造物点検データの有効活用を目的として、1)点検データを基に確率微分方程式による予測式により構造物の近未来の状態把握を行うこと、2)最適な点検・補修時期を理論的に求めること、更に3)道路、トンネル、橋梁などの構造物群で構成される道路ネットワークの維持管理補修戦略の構築を行った。膨大な社会資本の点検データは、いわゆる「ビック・データ」である。与えられたデータから有益な情報を見出し、社会資本の維持管理に必要な知見を与えることの学術的な意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to examine strategies for comprehensively maintaining and managing social infrastructure facilities, with a focus on network structures. Predicting the soundness and future deterioration of individual social infrastructure facilities, treating a group of facilities as a portfolio, considering physical loss and functional loss for the functions that should be fulfilled, and considering budget constraints and other conditions. construct a practical strategy for efficient budget allocation in Using stochastic differential equations for inspection data, theoretical development was carried out for prediction of deterioration of tunnel structures in the near future and formulation of repair strategies. We developed a method that considers correlation when evaluating the portfolio risk of a spatially spread structural system.

研究分野：構造信頼性

キーワード：structural deterioration network structure repair strategy asset management

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

土木工学の分野において21世紀は「ストック・メンテナンスの世紀」と呼ばれ、これまでに整備された道路・鉄道・トンネル構造物などの膨大な社会資本を適切に維持管理することにより、長期的に有効活用することが求められている。このために、社会資本の供用期間中に必要となる建設・維持管理、補修補強、廃棄および再構築などの費用に着目した社会資本整備・管理手法が注目されて、数多くの研究成果が発表されている。しかしながら問題の本質的な難しさから、点検データの蓄積、将来予測のための劣化曲線の提案、経済理論を援用したストックマネジメント理論の提案などの個別の課題に対する研究が多い。

一方、多くの施設を管理している企業体などは、自己の施設を包括的に維持管理する戦略を構築しているが、特に地方自治体などは、点検業務が十分に行われておらず、限られた予算制約の条件下で、維持管理が行われているとは言い難い状況であり、本研究の対象としているところである。

道路・水道はネットワークとしての機能が発揮されることが極めて重要である。例えば、道路ネットワークを構成する構造物は、橋梁、トンネル、土工および舗装などである。例えば、これらの構造物のいずれかが劣化損傷をすれば、一定区間の通行規制が余儀なくされる。道路構造物の種類により補修・補強期間に差はあるが、路線としての一定の管理水準を確保するためには、道路構造物を群として捉えた同一観点から評価を行い、限られた予算制約の中で脆弱部に対処することが重要である。ライフサイクルコスト最小化など提案されている評価基準が、現実の問題に適用されるには、点検データから構造物の現状把握、近未来における損傷・破壊を精度良く評価すること、そして、構造物をポートフォリオとして捉え、果たすべき機能を保証する構造物群としての維持管理戦略の構築が急務であると考えられる。前述したように、地方自治体に対しては、点検データの有効活用により、点検が不十分であっても具体的な対策を提示できるシステムが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、ネットワークを対象として、社会基盤施設群を、包括的に維持管理する戦略について検討することを目的としている。個々の社会基盤施設の健全度および将来の劣化状態を予測し、施設群をポートフォリオとして捉え、本来果たすべき機能に対して、物理的損失、機能的損失を考慮して、予算制約などの条件下で効率的な予算配分を行う実務的な戦略を構築する。

本研究の基礎理論における特徴は、蓄積がなされている点検データを、ビック・データとして捉え人工知能（artificial intelligence : AI）と総称される機械学習理論と確率論を融合した理論により、施設群の維持管理戦略に対する解析を行うことである。

### 3. 研究の方法

はじめに、不確定性を考慮出来る確率微分方程式により各種構造物点検データの劣化現象モデル化を行う。次に劣化挙動を表現する確率微分方程式をもとに、点検・補修の意思決定をする評価関数を設定して最適補修計画の理論解を求めることを行う。さらに、社会基盤施設は道路、橋梁およびトンネルなどの構造物群で構成されるネットワーク構造となっていることから、個々の構造物の劣化進行とネットワーク上構造物の機能を考慮した補修戦略の策定を行う。

本研究では、確率論を用いた最適維持管理戦略の策定を目指している。始めに供用期間中の点検データより得られた情報をもとに劣化過程モデルを構築して劣化予測を行うことを目的としている。現在、構造物の劣化予測のための多くのモデル式が提案されているが、多くのモデルは決定論に基づくもので、点検データの不確定性を考慮することができない。

また、構造物群としての維持管理を考えた時に、上記の手法により各構造物の不確定性を含む異なる劣化状態、ネットワークとしての機能保持および予算制約を考慮して、補修補強順位を含めた最適戦略を数理工学・最適化などにより理論的に定式化することは困難である。そこで、本研究では、これらの問題解決のために、人工知能（artificial intelligence : AI）と総称される機械学習理論と確率論を融合した理論により、施設群の維持管理戦略に対する解析を行う。

近年、人工知能技術は、確率論をベースとして飛躍的にその応用範囲が拡大している。その利点は、高度な解析理論に依らなくても解決策を提示できる点であり、そのことは、一度システムが構築されれば、汎用性があるという点である。

以下に、トンネル構造物の劣化状態予測手法と広域に分布する水道システム地震リスク評価の事例を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) トンネル構造物の劣化進展予測

図-1 および図-2 は、2008 年から 2017 年までのトンネル覆工コンクリートの点検結果である。119 区間のトンネル覆工コンクリートの劣化度の総点数を対数正規確率分布で記述している。点検記録は、定性的な状態を記述しているため、各劣化状態に係数を乗じて、文字データを数値データに変換している。経年劣化が進行するにしたがって、分布の右側のテール部分が広がっていることがわかる。

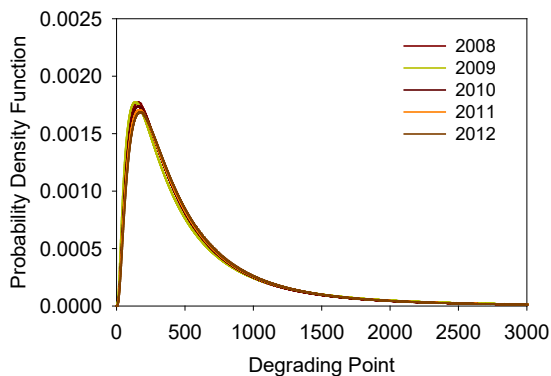


図-1 劣化度の分布 (2008 年-2012 年)

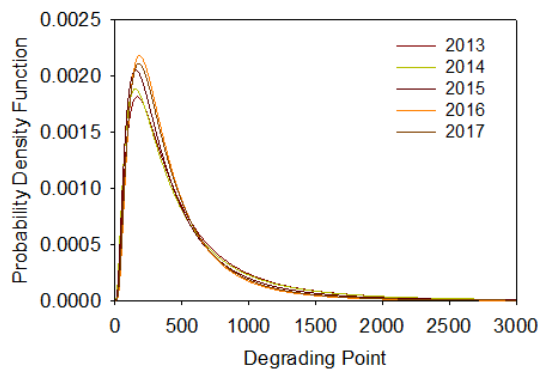


図-2 劣化度の分布 (2013 年-2017 年)

図-3 は、2008 年から 2012 年までの点検データに本研究で提案した確率微分方程式を用いて、5 年後である 2017 年の状態を内挿予測して、実際に得られている 2017 年の点検結果と比較したものである。予測の際に、1 覆工コンクリートごとに将来値を予測して、結果を統合することによりトンネル全体の劣化状態を求めている。予測値と実現値が概ね整合していることから、近未来の劣化予測に適用可能であることが検証された。図-4 は、同様に 2017 年までの点検データを用いて、2022 年を外挿予測したものである。従って、近未来の状態を予測して、補修時期を検討することが可能となる。

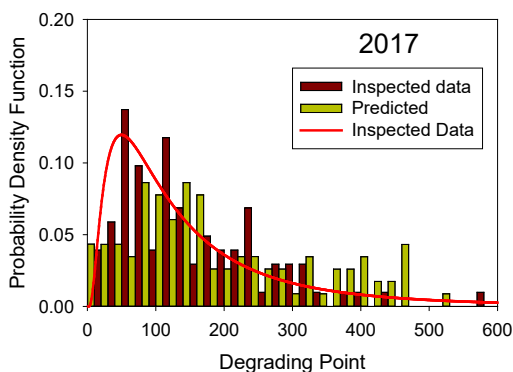


図-3 予測と実現値の比較

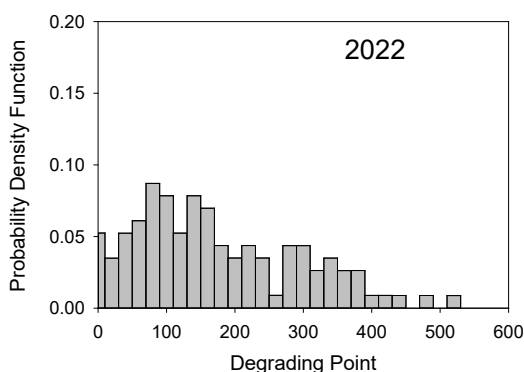


図-4 外挿予測結果

図-5 には、劣化ポイントが高い覆工コンクリート 10 位までを 10 年間 1 区間ごと補修するというシナリオによって、1000 ポイントを超過する確率の予測結果である。ここでは、補修効果は 1000 ポイントとしている。3 番目までの覆工コンクリートは、非常に大きな劣化度であるために、1000 ポイント超過確率が 1 となっている。4 位以降は、補修により超過確率が改善されているが、経年によって再度劣化が進行していることがわかる。図-6 は、補修対象外の 31 位から 41 位の劣化進展状況を示している。補修対象外の区間では、経年劣化が進行して、閾値である 1000 ポイント超過確率が増えていることがわかる。

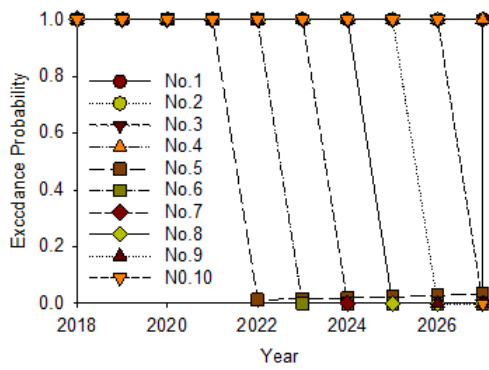


図-5 補修効果

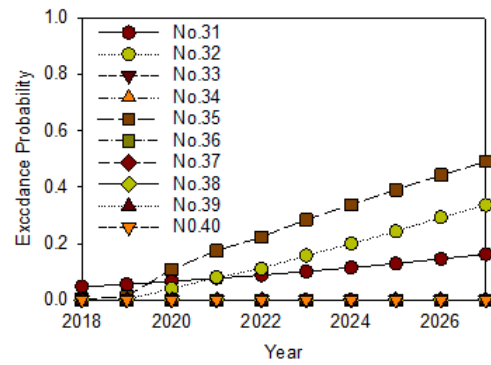


図-6 補修対象外の劣化進展

上記の結果から、将来の状態を予測して、補修シナリオを策定することが可能となると思われる。

(2) 上水道システム<sup>1)</sup>

水道システムを解析するために、地理情報システムを用いてデータベースを作成した。

図-7は、対象地区のL1レベル地震動の最大速度分布である。数多くの水道システムの被害予測式が提案されているが、ここでは日本水道協会式を用いて、1kmあたりの平均被害個所数を求めた(図-8)。この結果にメッシュ(500m×500m)内の管の長さに乗じることで被害個所を求めることができる。

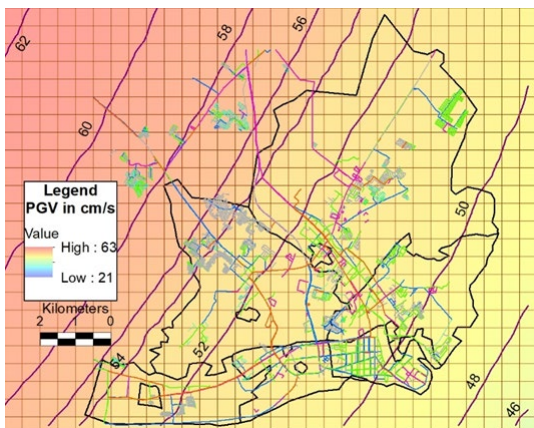


図-7 最大速度分布

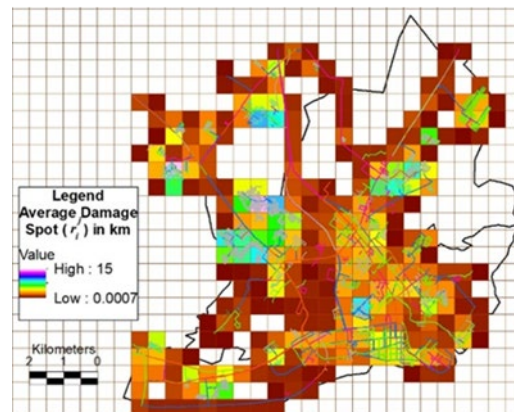


図-8 1kmあたりの平均被害個所数

本研究では、地理情報システムに273のメッシュごとに構築された被害情報を、対象地区全体におけるポートフォリオとして評価することを行う。その際に、重要となるのがメッシュ間の被害個所の相関である。ポートフォリオ理論によると独立とした平均被害個所数の総和は、中心極限定理により正規分布に収敛することが知られている。しかしながら、地震動の強さ、地盤情報は空間的に相関があるので、相関を考慮したポートフォリオとした、対象地区の地震リスクを評価することが必要となる。そこで、1メッシュの被害個所はポアソン分布に従うものとする一般的なモデル化を行い、相関のあるポアソン分布のシミュレーション法を用いて、モンテカルロ法により地震リスクの評価を行った。

図-9および図-10は、メッシュ間に相関を考慮しない場合の結果である。中心極限定理により正規分布に収敛していることがわかる。ここでは、シミュレーション結果を、正規分布と対数正規分布に当てはめている。しかしながら、平均値に対する分散値の比率、変動係数が小さな値となっており、被害個所数が決定論的な値に近づいている。このことは、平均的損失(NEL)と確率論的損失(PML)に差異がないことを示している。したがって、ポートフォリオリスク評価のためには、メッシュ間の相関を考慮することの重要性が認められる。

図-11および図-12は、メッシュ間の相関を相関係数0.5として仮定した結果である。独立の場合と違い、平均損失と確率論的損失に大きな違いがあることがわかる。一方、正規分布では負の損失が存在しているが、対数正規分布によると精度よく推定されていることがわかる。

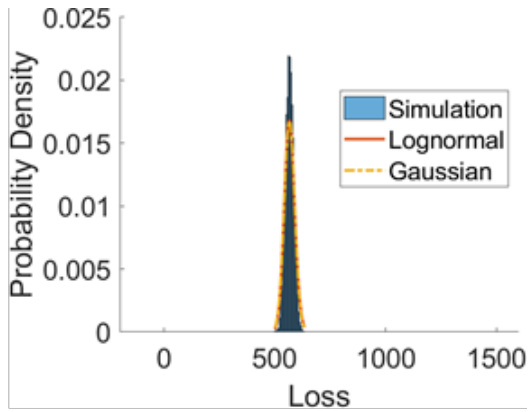


図-9 被害個所数の確率分布 (独立)

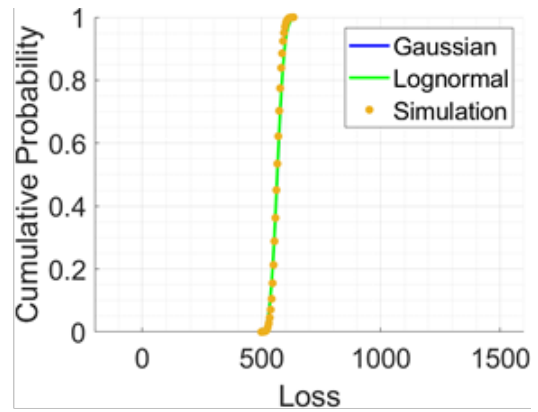


図-10 被害個所数の累積確率 (独立)

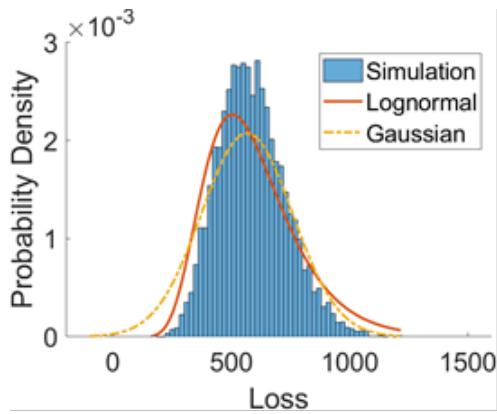


図-11 被害個所数の確率分布(相関 0.5)

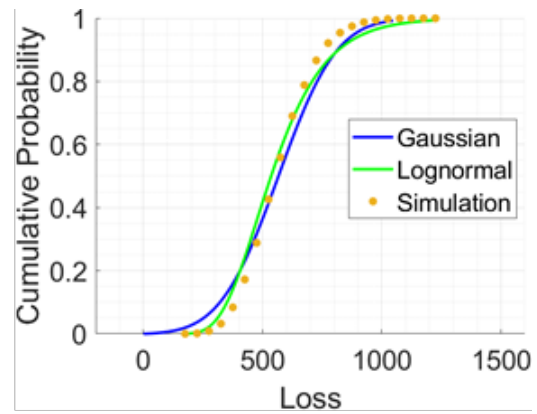


図-12 被害個所数の累積確率(相関 0.5)

以上、空間的な広がりのあるネットワーク系構造の劣化進展においても同様に空間相関を考慮することが必要となる。

参考文献)

1. Jarder, S.L.N., Garciano, L.E.O. and Maruyama, O. (2021), "Probable maximum loss of a pipe network due to earthquakes: a case study in Iloilo city, Philippines", International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, Vol. 12 No. 2, pp. 223-237.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Samantha Louise N. Jarder, Lessandro Estelito O. Garciano, Osamu Maruyama	4. 巻 Vol.12
2. 論文標題 Probable maximum loss of a pipe network due to earthquakes: a case study in Iloilo city, Philippines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment	6. 最初と最後の頁 223-237
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/IJDRBE-03-2020-0017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Carandang, A.M.S., Garciano, L.E.O., Maruyama, O. and De Jesus, R.	4. 巻 Vol.11
2. 論文標題 Proposed resilience index of water lifeline systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/IJDRBE-04-2020-0030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 兼清泰明, 東平蔵, 檀寛成, 須藤敦史, 丸山収, 佐藤京	4. 巻 Vol.9
2. 論文標題 リスク最適制御の数値解法に対する重点サンプリング法の適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Ninth Japan Conference on Structural Safety and Reliability	6. 最初と最後の頁 15-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Osamu Maruyama
2. 発表標題 Kernal Regression Estimator for Damage States of Tunnel Lining Concrete
3. 学会等名 The 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 OSAMU MARUYAMA
2. 発表標題 Kernel Regression Estimator for Damage States of Tunnel Lining Concrete
3. 学会等名 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関