

予算制約状況下における舗装更新待ち時間分析

大阪大学大学院	学生会員	○水谷 大二郎
大阪大学大学院	正会員	小濱 健吾
大阪大学大学院	正会員	貝戸 清之

1 はじめに

複数の社会基盤施設で構成される施設システムの補修・更新業務を行うにあたり、予算制約が存在する場合も少なくない。このとき、劣化の進展した施設全てに対し、即座に然るべき補修・更新を施すことは困難であり、劣化の進展から補修・更新の実施までに、待ち時間が生じる。本研究では、特に、高速道路舗装の更新業務に着目し、予算制約条件下での更新待ち時間を定量化することを目的とする。

具体的には、舗装維持管理指標（IRI、ひび割れ率、耐荷力など）により表現される劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデル [1] により表現し、舗装の劣化、待ち、更新過程を待ち行列理論 [2] の考え方にに基づき記述し、確率的シミュレーションによる解法を提案する。これにより、予算制約条件下での更新待ち時間分布を算出できる点に本研究の有用性がある。待ち時間分布を用いることにより、高速道路舗装のパフォーマンス評価の多様化、詳細化を実現できると考える。なお、本研究では、部材の脱落など、劣化事象の発現直後から即座に第三者被害に直結する事象ではなく、劣化事象の発現からある程度の期間は、利用者の走行快適性に対して主に影響するような劣化事象を対象としていることに留意されたい。

2 更新対象となる舗装区間の到着、待ち、更新過程

供用下における複数の管理単位（舗装区間）で構成される高速道路ネットワークにおいて、更新対象区間が発生し、更新待ち時間を経て、当該区間が更新される過程を待ち行列理論により記述する。本研究では、舗装に対する予防保全などは考慮せず、劣化の進展した舗装に対して、更新業務のみでその健全性が回復されると考える。

まず、 t_0 を起点とする離散的時間軸

$$t_{d+1} = t_d + z \quad (d = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

を定義する。 t_d を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。舗装に対する供用開始、点検、更新行為は全て離散的時間軸上の点 t_d で行われると考える。また、本研究で

は、時点の間隔 z を 1 年とする。

いま、 C 個の更新窓口 c ($c = 1, \dots, C$) を定義する。更新対象となる区間が先着順に 1 個の待ち行列を形成し、更新窓口が 1 個でも空くと待ち行列の先頭の区間が当該窓口に入り更新されると考える。ただし、2 個以上空いた場合には、窓口番号 c の最も小さい窓口に入るとする。更新対象区間に対して、到着順に番号 n ($n = 1, 2, \dots$) を付与する。このとき、 n 番目の区間の到着時点を A_n 、待ち時間を W_n 、更新に必要な時間を R_n とすると、 n 番目の区間の退去時点（更新完了時点） D_n は、

$$D_n = A_n + W_n + R_n \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

と表現でき、更新対象区間の到着、待ち、更新過程は、先着順複数窓口待ち行列モデルで表現できる。ここで、 A_n は、舗装の劣化過程に依存し確率分布すると考える。このことと、予算制約に起因し、 W_n に関しても、確率過程により、その生起過程を記述する必要がある。

管理対象とする舗装ネットワークは、 M 個の道路区間により構成されているとする。当該舗装ネットワークにおいて、更新すべき舗装区間の到着過程（到着率）または到着時点 A_n を、点検データを用いて推定されたマルコフ劣化ハザードモデルにより表現する。また、 R_n に関しては、 $R_n = z$ ($n = 1, 2, \dots$) と一定の値を取ると考える。このとき、予算により制限された、間隔 z 内に更新できる舗装区間の最大個数は C と一意に定まる。上述の待ち行列モデルにおいて、 A_n を求める際には、 M 個の区間の劣化過程を同時に考慮する必要がある。本研究では、確率的シミュレーションにより、更新すべき舗装区間の到着過程を表現する。具体的には、 M 個の区間の劣化状態を表す M 個のサンプルが同時に時間的に推移するような 100 年間のシミュレーションを 1,000 回行いサンプルパスを発生させ、劣化状態が確実に定常状態であると考え得る 50 年目以降の待ち時間を用いて待ち時間分布を算出した。以上の議論により、更新対象となる舗装区間の到着、待ち、更新過程は、 $G/D/C$ 型の待ち行列としてモデル化できる。

Keywords: アセットメトリクス、待ち行列理論、統計的劣化予測手法、マルコフ劣化ハザードモデル

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 工学研究科 E4 棟 332 号室 TEL: 06-6879-7622

Email: d-mizutani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

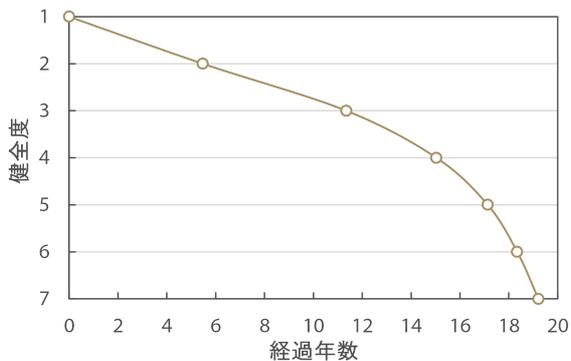


図 1: 期待劣化パス

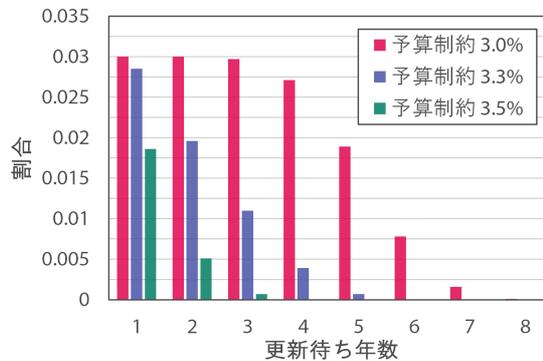


図 2: 更新待ち時間分布

3 実証分析

提案する方法論を用いて、実際の舗装点検データから劣化予測を行い、劣化予測結果を用いたシミュレーションにより、予算制約を所与としたときの舗装更新待ち時間分布を求める。高速道路舗装の具体的な維持管理指標として、本研究では、IRI 指標を用いて分析を行う。

3.1 マルコフ劣化ハザードモデルの推定

実在する高速道路における IRI の点検データを用いた劣化予測を行う。IRI の点検結果は、10m 毎の道路区間単位で獲得され、IRI 指標として観測される平坦性の回復を目的とした舗装の更新業務も 10m の道路区間単位で実施されていると仮定する。IRI の劣化過程を点検データを用いてマルコフ劣化ハザードモデルにより推定する。マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果は近年蓄積されてきており、本研究では、参考文献 [3] で用いたデータと推定結果を利用する。読者の便宜を図るために、待ち時間分布算出に用いたマルコフ推移確率行列を以下に示す。

$$\begin{pmatrix}
 0.833 & 0.153 & 0.013 & 0.001 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\
 0 & 0.844 & 0.137 & 0.017 & 0.002 & 0.000 & 0.000 \\
 0 & 0 & 0.762 & 0.187 & 0.039 & 0.009 & 0.003 \\
 0 & 0 & 0 & 0.621 & 0.250 & 0.088 & 0.042 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0.437 & 0.310 & 0.254 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.317 & 0.683 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000
 \end{pmatrix}$$

なお、上記のマルコフ推移確率は 1 年間の健全度推移を表す。また、図 1 には、IRI 指標の期待劣化パスを示した。本稿では、舗装の劣化過程をマルコフ推移確率として所与としたときの、更新待ち時間に注目するため、マルコフ劣化ハザードモデルにおける特性変数は考慮していない。上記のマルコフ推移確率と図 1 の期待劣化パスは、高機能舗装と密粒度舗装の混在する道路区間において 10m 毎の道路区間において獲得された 192,087 データを用いて推定した結果である。

3.2 更新待ち時間分布

劣化予測結果を用いたシミュレーションにより求めた予算制約状況下での期待待ち時間分布（各時点の待ち年数毎の割合の平均）を図 2 に示した。M = 1,000 とし、同図の縦軸の割合は、M 個の道路区間に対する、更新を待つ道路区間の割合を待ち年数毎に示している。同図では、3 種類の予算制約を設定している。予算制約は、期間 z 内に更新可能な道路区間数の M に対する割合 (C/M × 100 [%]) を示している。同割合は、予算制約にのみ依存して変化すると仮定し、3.0% から 3.3%、3.5% へと予算制約が緩まるにつれ、更新を待つ道路区間数が減少し、更新待ち年数も減少している様子を、本研究で提案する方法論では、定量的に評価することができる。

4 おわりに

本研究では、予算制約状況下の更新待ち時間分布の定量化のための方法論を提案した。待ち時間分布は、社会基盤施設の新たな維持管理指標となり得ると考える。一方、今後の課題として、本研究では先着順サービスを待ち行列モデルで設定したが、劣化予測段階において、特性変数や異質性を考慮すると同時に、更新業務に関して、個々の道路区間に対する最適更新優先順位付けルールを、待ち行列理論の枠組みの中で決定してゆくことが望ましい。

参考文献

[1] 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.

[2] 高橋幸雄, 森村英典: 混雑と待ち, 朝倉書店, 2001.

[3] 宮崎文平, 風戸崇之, 濱梶方希, 小濱健吾, 貝戸清之: 高機能舗装を対象とした高速道路の路面管理基準に関する実証的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3 (舗装工学論文集 Vol.18), pp.I-175-I-183, 2013.