

第VI部門

隠れマルコフ劣化モデルを用いた層別修繕によるたわみ回復量の評価

大阪大学工学部

大阪大学大学院工学研究科

中日本高速道路株式会社

京都大学経営管理大学院

学生員 ○ 新 雄成

正会員 貝戸 清之

正会員 神谷 恵三

フェロー 小林 潔司

1. はじめに

我が国における高速道路のアスファルト舗装表層では、近年では密粒度舗装から高機能舗装への移り変わりが進み、損傷部位・修繕の深層化が起きている。このような高速道路舗装の効率的な維持管理に向けて、本研究では、舗装構造の劣化予測と層別修繕効果の評価を行う方法論を提案し、その適用事例について考察する。以下、2.では本研究の基本的な考え方、3.では隠れマルコフ劣化モデルの定式化、4.では高速道路を対象とした適用事例について述べる。

2. 本研究の基本的な考え方

社会基盤施設を対象とした劣化予測手法であるマルコフ劣化ハザードモデルの開発以降、その応用モデルが数多く開発されている。これらのモデルを舗装構造に適用した事例も存在し、その際には FWD(Falling Weight Deflectometer)調査から獲得されるたわみ量をもとに耐荷力ランクを定め、舗装構造の健全度としている。マルコフ劣化ハザードモデルの推定には 2 時点間の耐荷力ランク推移に関するデータが必要となる。調査データの中には 2 時点の調査の間に修繕履歴が残るものも一部存在するが、これまでの舗装構造に対する適用事例でこれらのデータは推定に利用されていない。

アスファルト舗装は道路表面から順に表層、基層、上層路盤、下層路盤により構成される。表層は密粒度舗装と高機能舗装に大別され、近年では高機能舗装が標準的に採用されている。高機能舗装には、滑りを軽減する、車両騒音を吸音する等の機能的特徴のほか、表層から基層へと雨水を通水させるという構造上の特徴がある。そのため、損傷が基層以下の深層において発生しやすく、基層や上層路盤、下層路盤まで打ち替える修繕が標準になりつつある。しかし、深層を対象とした修繕は費用や工事期間が嵩むこととなり、予算の制約等からその修繕延長を伸ばすことは難しい。修繕を実施すべき区間を適切に選定し、最も効果的な層に対して修繕

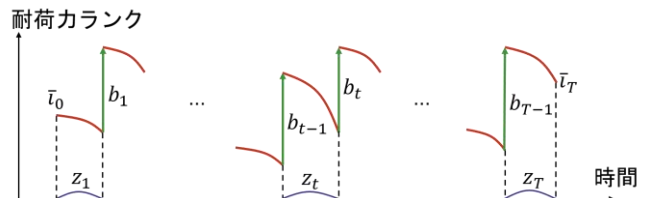


図-1 耐荷力の推移

を行うことで舗装維持管理の効率化を図る必要がある。

本研究では、耐荷力の推移を、1)経年により耐荷力が低下する劣化過程と、2)修繕時に耐荷力が向上する回復過程の複合過程として記述する(図-1)。図中、2 時点における耐荷力ランク i_0, i_T 、修繕層 $b_1, \dots, b_{T-1}$ 、調査時点と修繕時点の間隔 $z_1, \dots, z_T$ は FWD 調査記録と修繕履歴から獲得される情報である。これらの情報に修繕直前・直後のランクが隠れているとする。そして、劣化・回復過程の推移確率と修繕履歴をもとに 2 時点における調査結果が獲得される尤度を定式化し、劣化・回復の複合過程を隠れマルコフ劣化モデルで表現する。これにより、2 時点の調査の間に修繕履歴が残るデータをマルコフ劣化ハザードモデルの推定に用いることが可能となる。さらに、回復過程の推移確率を修繕層別に推定することにより、層別修繕によるたわみ回復量の評価が可能となり修繕効果の定量的な評価につながる。

3. モデルの定式化

本研究では、劣化過程のマルコフ推移確率の推定にマルコフ劣化ハザードモデルを使用する。期間 z にランクが i から j へと推移する推移確率 $\pi_{ij}(z)$ は、ランク i のハザード率 θ_i を用いて、

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} \exp(-\theta_s z) \quad (1)$$

と表される。次に、回復過程のマルコフ推移確率をノンパラメトリックな離散確率分布で表現する。層別修繕 b

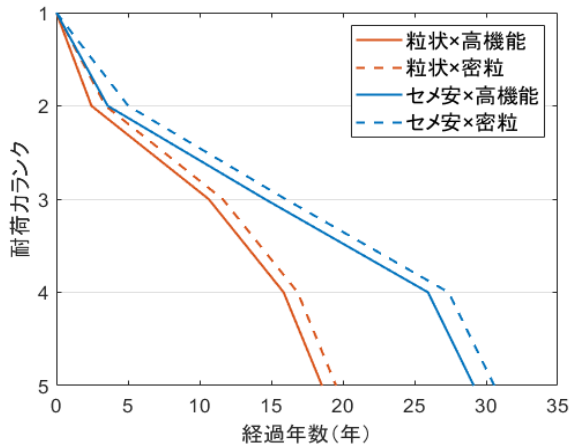


図-2 パフォーマンスカーブ

によってランクが i から j へと推移する推移確率 r_{ij}^b は,

$$r_{ij}^b = \begin{cases} \alpha_{ij}^b & (i \geq j \text{ のとき}) \\ 0 & (i < j \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

と表される。ただし、 α_{ij}^b は定数であり、

$$0 \leq \alpha_{ij}^b \leq 1 \quad (3a)$$

$$\sum_{j=1}^i \alpha_{ij}^b = 1 \quad (3b)$$

を満足する。修繕層ベクトル $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_{T-1})$ と調査・修繕間隔ベクトル $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_T)$ を与件とし、ランク $\{\bar{r}_0, \bar{r}_T\}$ が観測される尤度 $\mathcal{L}(\alpha, \beta, \bar{r}_0, \bar{r}_T, \mathbf{b}, \mathbf{z})$ は、再帰的に

$$\mathcal{L}(\alpha, \beta, \bar{r}_0, \bar{r}_T, \mathbf{b}, \mathbf{z}) = \ell_0^\pi(1)$$

$$\ell_h^\pi(t) = \sum_{w=h}^I \pi_{hw}(z_t) \ell_w^r(t) \quad 1 \leq t \leq T-1$$

$$\ell_h^\pi(T) = \pi_{hT}(z_T) \quad t = T \quad (4)$$

$$\ell_h^r(t) = \sum_{w=1}^h r_{hw}^{b_t} \ell_w^\pi(t+1) \quad 1 \leq t \leq T-1$$

と定義される。さらに本研究では、潜在変数を導入した完備化尤度関数を定式化しベイズ推定を行う。

4. 適用事例

本研究で提案した隠れマルコフ劣化モデルを実際に獲得されたFWD調査データに対して適用する。表層種別(高機能舗装または密粒度舗装(以下、高機能・密粒))や下層路盤種別(粒状路盤またはセメント安定処理路盤(以下、粒状・セメ安))が劣化過程に与える影響を定量化するために、特性変数を設定し推定を行った。その結果から得られた耐荷力のパフォーマンスカーブを図-2に示す。同図より、密粒は高機能に比べ耐荷力の低下が遅いことがわかる。また、推定結果にも表れている

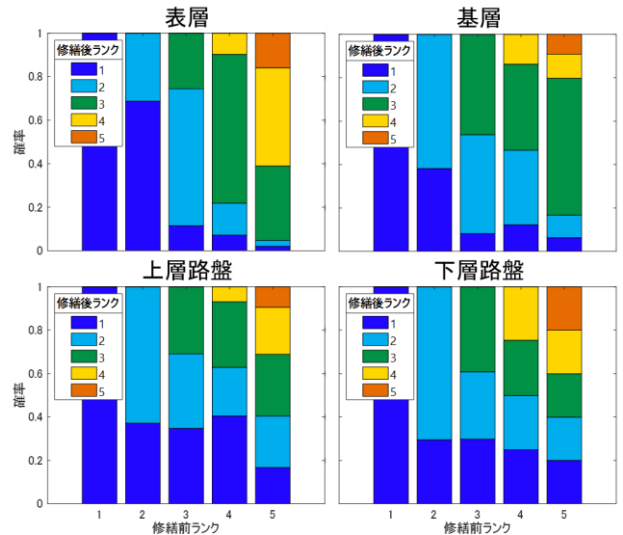


図-3 回復過程推移確率

ように、セメ安は粒状に比べ劣化が遅いことが判明して以降、下層路盤のセメ安への打ち替えが推進されている。本研究の提案手法を用いた劣化予測や、後述する回復過程推移確率等をもとに最適な下層路盤打ち替え時期を検討することにより、道路管理者の意思決定を支援できる可能性がある。

次に、層別修繕による回復過程推移確率の推定結果を図-3に示す。下層路盤修繕はサンプルが少なく、事前分布の影響を強く残した推定結果である。しかし、その他の推定結果は、修繕時に低いランクへと推移する確率が、深層を修繕の対象とした場合に大きくなることを示唆している。ランク1まで回復する確率はおおよそ上層路盤修繕が最も高い一方で、図-2よりランク1の期待寿命は比較的短いため、一概に深層を修繕対象とすることが最適であるとはいえない。

5. おわりに

本研究では、表層の遷移に伴い損傷部位・修繕が深層化する高速道路舗装を対象に、舗装構造の劣化予測、及び層別修繕効果の評価を行う方法論を提案した。具体的には、舗装構造の耐荷力推移を劣化・回復の複合過程として記述する隠れマルコフ劣化モデルを定式化し、2時点の調査の間に修繕履歴が残るデータを用いた劣化予測、及び層別修繕効果の定量的な評価を行った。

【参考文献】

- 1) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.