

層別修繕による回復を考慮した舗装構造耐荷力の経年推移予測

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○ 新 雄成
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸 清之
 中日本高速道路株式会社 正会員 神谷 恵三
 京都大学経営管理大学院 フェロー 小林 潔司

1. はじめに

我が国の高速道路舗装では、表層材料が密粒度舗装から高機能舗装へと推移したことで、経年に伴う構造耐荷力の低下が相まって、損傷部位の深層化が生じている。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

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高むこととなり、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を行うことで舗装維持管理の効率化を図る必要がある。

社会基盤施設の劣化予測手法としてマルコフ劣化ハザードモデルが開発されて以降、幅広い施設を対象に適用事例が増えている。舗装構造を対象にした研究事例も数多く存在し、これらの事例では FWD(Falling Weight Deflectometer)調査により獲得されるたわみ量から耐荷力ランクを定め、舗装構造の健全度指標としている。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、これらのデータは一般的に

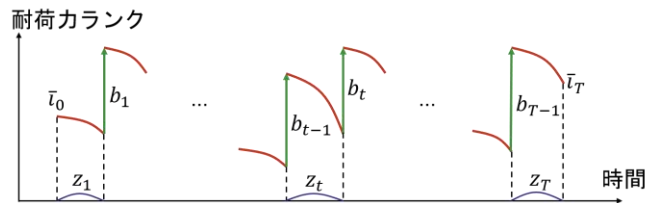


図-1 耐荷力の推移

はモデル推定の際に除外される。

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が含まれ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、層別修繕のたわみ回復量を評価することが可能となり、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

キーワード 舗装, FWD, 隠れマルコフモデル, 層別修繕

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 工学研究科 AR 棟 605 号室 TEL 06-6879-7622

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 $\{\bar{l}_0, \bar{l}_T\}$ が観測される尤度 $\mathcal{L}(\alpha, \beta, \bar{l}_0, \bar{l}_T, \mathbf{b}, \mathbf{z})$ は、再帰的に

$$\mathcal{L}(\alpha, \beta, \bar{l}_0, \bar{l}_T, \mathbf{b}, \mathbf{z}) = \ell_{\bar{l}_0}^{\pi}(0)$$

$$\ell_h^{\pi}(t-1) = \sum_{w=h}^I \pi_{hw}(z_t) \ell_w^r(t) \quad 1 \leq t \leq T-1 \quad (4)$$

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

$$\ell_h^{\pi}(T-1) = \pi_{hT}(z_T) \quad t = T$$

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中日本高速道路株式会社が所管する高速道路において獲得された FWD 調査データに対して適用する。その際、 D_0 たわみ量をもとに耐荷力のランク付けを行った。また、 D_0 たわみ量は、As 層厚（表層、基層、上層路盤の合計層厚）の影響を強く受けると考えられたため、As 層厚をもとに説明変数を設定し推定を行った。その結果から得られた As 層厚ごとの耐荷力のパフォーマンスカーブを図-2 に示す。As 層厚が大きくなると耐荷力ランクの低下速度は小さくなるのが読み取れる。また、調査区間の中で最も As 層厚の大きい場合（28cm）と小さい場合（20cm）では、耐荷力ランクが 6 に達するまでには約 17 年の差異が生じることがわかる。

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。劣化過程は、説明変数を考慮することにより As 層厚ごとのパフォーマンスカーブを描くことができている一方で、回復過程については説明変数を

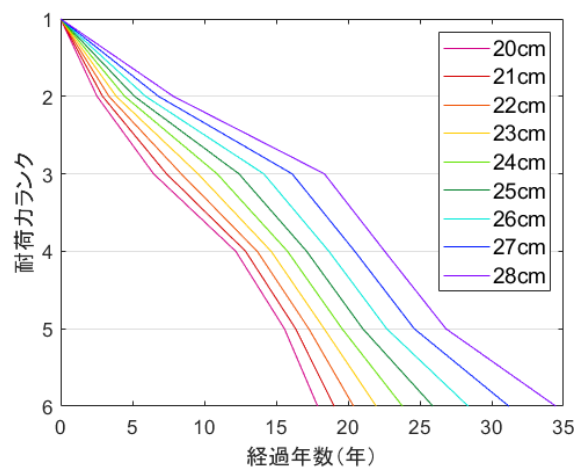


図-2 パフォーマンスカーブ

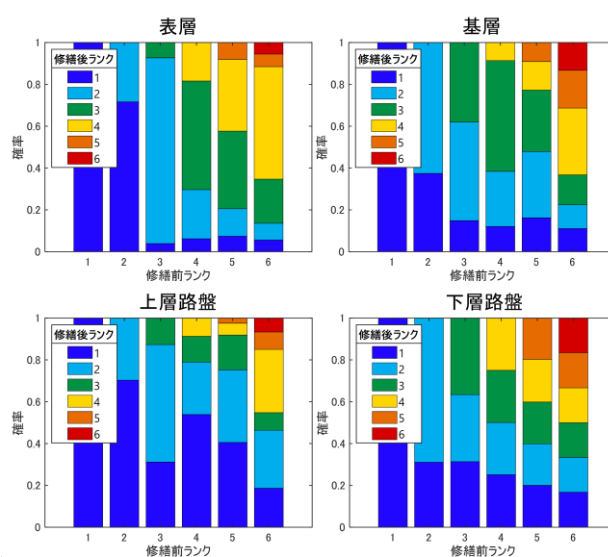


図-3 回復過程推移確率

考慮するには至っていない。回復過程の説明変数を考慮したモデルの開発については今後の課題としたい。

5. おわりに

本研究では、表層の高機能舗装化に伴い損傷部位・修繕が深層化する高速道路舗装を対象として、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た。これにより、調査時点間に修繕履歴の存在するデータをもとにした劣化予測に加え、層別修繕効果の定量的な評価が可能となった。

【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.