

大阪大学大学院 学生会員 ○北浦 直樹, 宮崎 文平

正会員 小濱 健吾, 貝戸 清之

京都大学経営管理大学院 フェロー会員 小林 潔司

1. はじめに

道路舗装構造物の劣化過程は、路面の劣化と耐荷力の低下という劣化メカニズムが異なる複合的な劣化現象を有している。舗装の耐荷力が低下すれば、路面の劣化速度に影響を及ぼす。一方で、路面の劣化が進行すれば、耐荷力の低下をもたらす可能性がある。また、耐荷力情報を得るためのFWD 調査と路面健全度情報を得るための路面性状調査が同時に実施されず、部分的な情報しか得ることができない。本研究では、劣化状況を調べる2 種類の調査の頻度が非同期である問題を考慮して、路面の劣化と舗装耐荷力の低下という2 つの劣化事象に対して、一方の劣化状態が他方の劣化速度に影響するような相互作用を持つ複合的な劣化過程を複合的隠れマルコフ劣化モデルとして定式化する。

2. 複合的隠れマルコフ劣化モデル

FWD 調査を実施するためには、莫大な調査費用と交通規制等の社会的費用を要するため、道路管理者が全ての道路区間に対して FWD 調査を行うことは、現実的ではない。路面では、劣化の進展によりひび割れやわだち掘れ等の損傷が発生する。加えて、耐荷力が著しく劣化している区間では、路面の劣化速度が加速される可能性がある。このような観点から、小林等¹⁾は、路面の劣化速度が舗装の耐荷力の低下状態に依存するような、階層的隠れマルコフ劣化モデルを提案している。一方、高い浸透機能を有する高機能舗装の導入以降、耐荷力の低下速度は、雨水や地下水の浸透に影響されやすくなっている。路面の劣化が進展すれば、舗装深部に浸水する可能性が増加する。すなわち、路面の劣化が耐荷力の低下過程の加速にもつながる。このような関係を踏まえた上で、路面性状調査の結果から路面の劣化速度を評価し、舗装構造の耐荷力低下に関する重点管理区間が抽出できれば、FWD 調査等を用いて舗装の維持管理を効率的に実施することが可能となる。複合的隠れマルコフ劣化モデルでは、路面と耐荷力の

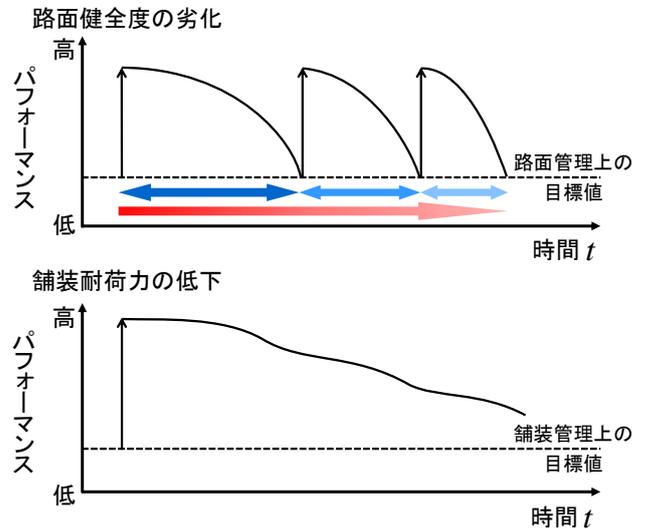


図-1 路面と耐荷力の複合的劣化過程

劣化状態が双方の劣化速度に対して影響を及ぼすという複合的な相互作用が存在すると考える。図-1 では、舗装の複合的劣化過程を模式的に示している。また、路面性状調査から路面の健全度は観測できるが、舗装の耐荷力は観測できない。このように、路面健全度の情報と舗装耐荷力の情報の同時点での獲得が現実的ではない観測環境における各観測値のシステム的な欠損問題が存在する。この問題を考慮して、路面の劣化過程と舗装の耐荷力の低下過程に対して相互作用を持つ道路舗装の複合的な劣化過程を定式化する。

耐荷力の低下が路面の劣化速度に及ぼす影響として、劣化速度を表すハザード率 μ^i に劣化速度の異質性を表すスケールパラメータ γ_0^s を導入する。同様に、路面の劣化が耐荷力の低下速度に及ぼす影響として、ハザード率 λ^s にスケールパラメータ β_0^i を導入する。

$$\mu^i(s) = \gamma_0^s \mu^i$$

$$\lambda^s(i) = \beta_0^i \lambda^s$$

$\mu^i(s)$ は耐荷力 s 、路面健全度 i における路面の劣化速度であり、 $\lambda^s(i)$ は耐荷力の低下速度である。このようにして、路面と耐荷力の間で、一方の劣化状態が他方の劣化速度に対して及ぼす影響を表すことができる。

複合的隠れマルコフ劣化モデルでは、路面健全度に対するマルコフ推移確率 π^{ij} と舗装耐荷力に対するマルコフ推移確率 p^{sv} をかけ合わせることで、複合的劣化過程をマルコフ推移確率 ω_{is}^{jv} として定義できる。

$$\omega_{is}^{jv} = p^{sv}(i)\pi^{ij}(s)$$

3. 実証分析

(1) 適用事例の概要

舗装の劣化過程の分析のために、全国の高速道路 51 路線から無作為に抽出し、実施された高速道路舗装の調査の結果として、15,626 の 100m 単位の道路区間に対して、路面性状調査と FWD 調査の 2 種類のデータが蓄積されている。適用事例としてとりあげた道路区間では、複数の時間断面において調査が実施されている。さらに、対象期間中に路面補修と舗装の更新の両方が実施されている。建設時点に関するデータが利用可能であるため、建設時点から最初の調査時点までの期間、調査時点から次の調査時点に至るまでの期間のそれぞれを 1 単位のサンプルデータと定義した。モデル推計に用いたサンプル数は、路面健全度については 2,641 個、耐荷力については 2,552 個となる。本研究の提案モデルを含む混合分布モデルは、尤度関数が特殊な形をしているため、通常最尤法やベイズ推計法を用いることが困難である。このようなことから、通常最尤法ではなく、完備化尤度関数を定義するとともに、MCMC 法を用いて推計を行う。推計では、路面の劣化過程と耐荷力の低下過程に影響を及ぼすと考えられる説明変数を検討した。具体的には、1) 地域特性、2) 舗装種別、3) 舗装厚、4) アスファルト層厚、5) 大型車交通量、である。

(2) 推計結果及び考察

前述した 5 つの説明変数候補のもとで、本研究で提案した複合的隠れマルコフ劣化モデルを推計した結果を用いて、路面健全度のパフォーマンスカーブを **図-2** に、耐荷力のパフォーマンスカーブを **図-3** に示している。路面健全度では大型車交通量による交通区分（軽・中、重交通区間）が、耐荷力では地域特性とアスファルト層厚（220mm 未満、220-260mm、260mm 以上）が、説明変数として採用された。**図-2** は重交通区間、**図-3** は一般地域かつ、アスファルト層厚が 260mm 以上におけるパフォーマンスカーブである。路面の劣化状態により、耐荷力の低下速度は最大で 1.40 倍大きくなる。対して、耐荷力の低下状態により、路面の劣化速度は

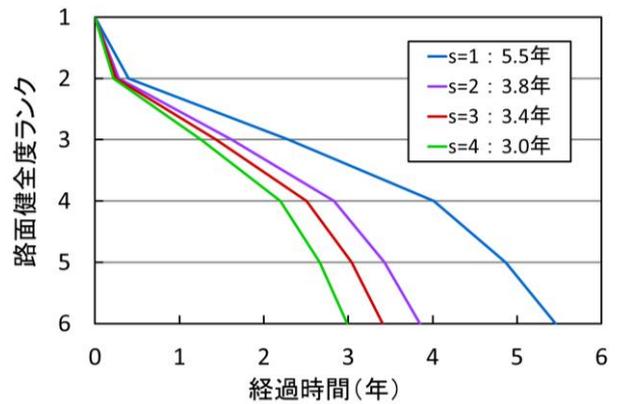


図-2 路面健全度のパフォーマンスカーブ

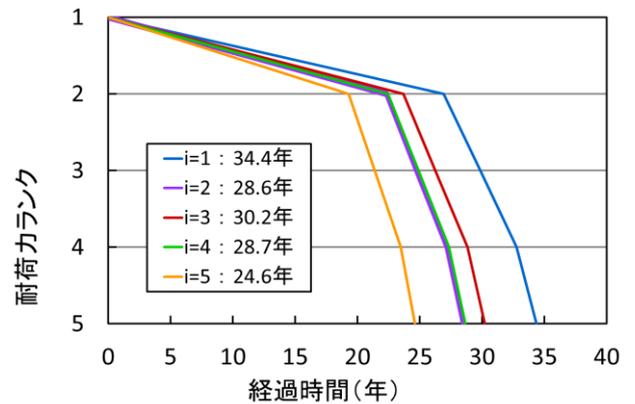


図-3 耐荷力のパフォーマンスカーブ

最大で 1.83 倍大きくなる。このように、路面と耐荷力の複合的な劣化過程においては、双方向の影響が存在することがわかった。本研究で提案した複合的隠れマルコフ劣化モデルにより、各観測値の欠損問題を解決するとともに、劣化過程にもたらす相互作用を考慮したより精緻な推計が可能となり、路面の劣化と耐荷力の低下という複合的な劣化過程が定式化された。

4. まとめ

本研究では、複合的隠れマルコフ劣化モデルにより、路面と耐荷力の双方の劣化過程に影響を及ぼす複合的な劣化過程の存在を示し、現実起こりうる劣化状況の調査頻度の非同期性を考慮したモデルの定式化と実証分析を行なった。今後は舗装構造物の最適更新時期と路面の最適補修時期の双方を考慮した上でのライフサイクル費用評価手法の開発など、複数の劣化過程によって道路管理者が取りうる実務的な手法の研究が可能と考えられる。

【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, pp422-440, 2011