

アスファルト舗装設計手法の 妥当性に関する検討

小濱健吾¹・宮崎文平²・大井明³・貝戸清之⁴・小林潔司⁵

¹正会員 大阪大学特任研究員 大学院工学研究科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: b-miyazaki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒 194-8508 町田市忠生 1-4-1)
E-mail: a.oi.aa@ri-nexco.co.jp@

⁴正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

⁵フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院経営管理講座 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

舗装の各層の厚さの決定は重要な課題である。現行の手法では、路床の設計 CBR と総通過 10 トン換算軸数から定めた T_A (等値換算厚) に基づいて決定する、アスファルト舗装設計手法 (以下 T_A 法) によって決定されている。しかしながら、表層の高機能化に伴い、設計手法確立および設計基準作成当時とアスファルト舗装の劣化過程は大きく異なっており、実務において T_A 法に基づく設計の妥当性が疑問視されてきている。本研究では T_A 法の妥当性について検討する。具体的には、マルコフ劣化モデルに基づく劣化曲線の T_A 値によるばらつきを比較し、 T_A 値が表層種別、路盤種別、As 層厚といった舗装における種々の劣化要因を代替するものとして機能しているかを検証する。検証を行う上では、NEXCO が管理する全国の高速道路を対象とした FWD 調査データを使用し、実証的な分析を試みる。

Key Words : *pavement management, T_A method, Markov hazard model*

1. はじめに

アスファルト舗装は、路盤とアスファルト混合物により多層に構築された舗装構造を指し、路床上に路盤・基層・表層の順に構成される。また、平坦性や補修の容易さなどに優れた特徴を持ち、高速道路の舗装の大部分を占めるものである¹⁾。高速道路では、高速走行車両に対して良好な供用性を確保するため、長期間にわたって耐久性の高い舗装構造とするために、適切な構造設計を行わなければならない。

我が国の高速道路において、アスファルト舗装の構造設計は T_A (等値換算厚) 法によることを原則としている。 T_A 法は、米国 AASHO 道路試験を基にした設計法であり、路床の設計 CBR と設計交通量から求められる T_A (等値換算厚) を基に、舗装各層の厚さを決定する手法である。しかし、我が国では 30 年程度の経験を有する T_A 法ではあるが、その成立過程や根拠には種々の仮定が設定されており、必ずしも実際において適切であるとは言い難い²⁾。

一方、 T_A 法により設計されたアスファルト舗装に関する諸データが蓄積されてきており、また、近年の統計的劣化手法の目覚ましい発展により、アスファルト

舗装の構造設計を統計的に評価することが可能となってきた。

以上の背景より、本研究では、 T_A 法の成立過程における仮定や問題点を見直し、現行の T_A 法を改良するための一材料として、マルコフ劣化モデル³⁾を用いて統計的にアスファルト舗装の劣化過程を評価する。以下、**2.** ではアスファルト舗装の構造設計、および T_A の基本的な考え方を説明する。**3.** では、マルコフ劣化モデルの概要を簡単に記述し、**4.** では、NEXCO が管理する全国の高速道路を対象とした FWD 調査データを利用し、実証的な分析を試みる。

2. アスファルト舗装の構造設計に関して

アスファルト舗装の各層厚は T_A 法に基づいて決定される。本節では、舗装各層の決定手順に関して簡単に説明する。以下では、舗装厚の単位はすべて cm とする。

- T_A (等値換算厚) を、累積 10 トン換算軸数 (10 トン軸重に換算した軸数での設計期間中の総通過回数) および設計 CBR (路床土の CBR) を用いて計算する。
- T_A を用いて、舗装全厚の最小厚 H_{min} を決定し、

表-1 等値換算係数

T	工法・材料	条件	等値換算係数		
			a ₁	a ₂	a ₃
T ₁	表層および基層用混合物		1.00	-	-
T ₂	加熱アスファルト安定処理	タイプ I	-	0.80	-
		タイプ II	-	0.68	-
		一軸圧縮強さ 3N/mm ² 以上	-	0.45	-
T ₃	セメント安定処理 粒状材料	修正 CBR 80 以上	-	0.32	-
		修正 CBR 60 以上	-	-	0.28
		修正 CBR 30 以上	-	-	0.25

さらに、次の式を満たすように各層厚を決定する。

$$T_A \leq a_1 T_1 + a_2 T_2 + a_3 T_3 \quad (1a)$$

$$T_1 + T_2 \geq T_{min} \quad (1b)$$

$$H_{min} \leq T_1 + T_2 + T_3 \quad (1c)$$

ただし、T₁ は表層および基層の厚さ、T₂ は上層路盤の厚さ、T₃ は下層路盤の厚さ、T_{min} は表層、基層、および加熱アスファルト安定処理盤から構成されるアスファルト混合物層の最小厚であり、a_i (i = 1, 2, 3) は表-1 に示す等値換算係数である。また、決定に当たっては、現地ですべて入手できる材料、気象条件及び施工性などを十分考慮し、最も経済的かつ合理的に各層厚を配分する。

手順 (a), (b) にしたがって舗装各層厚は決定される。しかし、手順 (a) における計算手順には、T_A と設計 CBR の比例関係における比例定数が、軸荷重が異なる場合でも等しいという仮定を置いている。また、手順 (b) では、表-1 に示すように、表層や基層に用いる材料に関わらず、等値換算係数は等しいという仮定を置いている。これらの仮定が現在においても問題なく適用できるかどうか疑問視されてきている。特に、表層に用いる材料の高機能化により、従来までの表層材料との根本的な劣化過程の違いが指摘されている。本研究では、上述した仮定に対する妥当性の検討として、蓄積されたデータをもとに統計的にアスファルト舗装の劣化を評価する。

3. マルコフ劣化モデル

(1) マルコフ推移確率モデル

アスファルト舗装の劣化過程をマルコフ推移確率モデルを用いて表現する。いま、2つの時刻間におけるレーティング間の推移状態をマルコフ推移確率で表現する。時刻 τ_A におけるレーティングを状態変数 h(τ_A) を用いて表そう。時刻 τ_A におけるレーティングが i (i = 1, ..., I) であれば h(τ_A) = i と表せる。マルコフ推移確率は、時刻 τ_A で観測されたレーティング h(τ_A) = i を与件とし、将来時点 (例えば τ_B) においてレーティング h(τ_B) = j

が生起する条件付推移確率として定義される。すなわち、

$$\text{Prob}[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] = \pi_{ij} \quad (2)$$

と表せる。このような推移確率をレーティングペア (i, j) に対して求めれば、マルコフ推移確率行列

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II} \end{pmatrix} \quad (3)$$

を定義できる。マルコフ推移確率 (2) は所与の2つの時点 τ_A, τ_B の間において生じるレーティング間の推移確率を示したものである。当然のことながら、対象とする検査間隔が異なれば推移確率の値は異なる。補修がない限り常に劣化が進行するので、π_{ij} = 0 (i > j) が成立する。また、推移確率の定義より ∑_{j=i}^I π_{ij} = 1 が成立する。すなわち、マルコフ推移確率に関して

$$\left. \begin{aligned} \pi_{ij} &\geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, I) \\ \pi_{ij} &= 0 \quad (i > j \text{ の時}) \\ \sum_{j=i}^I \pi_{ij} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

が成立しなければならない。状態 I は、補修のない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり、π_{II} = 1 が成立する。なお、マルコフ推移確率は過去の劣化履歴とは独立して定義される。マルコフ劣化モデルでは、レーティングが i-1 から i に推移した時刻に関わらず、検査時刻 τ_A から検査時刻 τ_B の間に推移する確率は時刻 τ_A におけるレーティングのみに依存するという性質 (マルコフ性) を満足する。

(2) マルコフ劣化モデル

マルコフ推移確率は、マルコフ劣化モデルを用いて推定できる。本研究では、津田等³⁾が開発したマルコフ劣化モデルを用いるが、読者の便宜を図るためモデルの概要を説明しておく。いま、レーティング i (i = 1, ..., I-1) の寿命を確率変数 ζ_i で表す。レーティング i の寿命が、確率密度関数 f_i(ζ_i)、分布関数 F_i(ζ_i) に従うと仮定する。ここで、レーティングが変化した時刻 τ_i (i = 0, ..., I-2) を起点とする時間軸 (以下、サンプル時間軸と呼ぶ) を考えよう。レーティング i のサンプル時間軸上で、カレンダー時刻 τ_{i-1} からの経過時

間を y_i と表記する。定義より、時刻 τ_{i-1} では $y_i = 0$ となる。ここで、時刻 τ_{i-1} にレーティングが i となり、そこから時間 y_i が経過した時刻においてレーティングが $i+1$ に変化する確率密度をハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ を用いて表現する^{4),5)}。ハザード関数は、レーティングが i となった時刻から、時間 y_i が過ぎる間、レーティングが i のまま継続する生存確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて、

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i = \frac{f_i(y_i)\Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (5)$$

と表せる。すなわち、ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ は、初期時刻 τ_{i-1} ($y_i = 0$) から時間 y_i が経過するまでレーティング i の状態が継続したという条件の下で、期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i)$ 中にレーティング $i+1$ に進展する条件付確率である。ハザード関数が経過時間 y_i に依存せず、常に一定値 $\lambda_i > 0$ ($i = 1, \dots, I-1$) をとる場合、指数ハザード関数

$$\lambda_i(y_i) = \lambda_i \quad (6)$$

が成立する。指数ハザード関数を用いることにより、劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現できる。さらに、指数ハザード関数を用いれば、レーティング i の寿命が y_i 以上となる確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ は、

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\lambda_i y_i) \quad (7)$$

と表現できる。

さらに、カレンダー時刻 τ_A の目視検査の結果、レーティングが i と判断されたとしよう。そのうち、時刻 τ_A から追加的に期間 z (≥ 0) 以上にわたってレーティング i が継続する確率 $\tilde{F}_i(\tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A)$ は、

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(\tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A) &= \text{Prob}\{\zeta_i \geq \tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A\} \\ &= \frac{\exp\{-\lambda_i(\tau_A + z)\}}{\exp(-\lambda_i \tau_A)} = \exp(-\lambda_i z) \end{aligned} \quad (8)$$

と表される。すなわち、検査時刻 τ_A においてレーティングが i と判定され、次の検査時刻 $\tau_B = \tau_A + z$ においてもレーティングが i と判定される確率は、

$$\text{Prob}[h(\tau_B) = i | h(\tau_A) = i] = \exp(-\lambda_i z) \quad (9)$$

となる。ただし、 z は2つの検査時刻の間隔を表す。確率 $\text{Prob}[h(\tau_B) = i | h(\tau_A) = i]$ はマルコフ推移確率 $\pi_{ii}(z)$ にほかならない。指数ハザードを用いた場合、推移確率 $\pi_{ii}(z)$ はハザード関数 λ_i と検査間隔 z のみに依存し、時刻 τ_A 、 τ_B に関する情報を用いなくとも推移確率を推定することが可能となる。以上の議論を拡張し、指数ハザード関数を用いて、検査時刻 τ_A と $\tau_B = \tau_A + z$ の間でレーティングが i から j ($> i$) に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z)$ ($i = 1, \dots, I-1; j = i, \dots, I$) は、

$$\begin{aligned} \pi_{ij}(z) &= \text{Prob}[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] \\ &= \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \\ &(i = 1, \dots, I-1; j = i+1, \dots, I) \end{aligned} \quad (10)$$

表-2 舗装健全度

健全度	損傷指標 D_0
1	$0 \leq D_0 \leq 0.10$
2	$0.10 < D_0 \leq 0.15$
3	$0.15 < D_0 \leq 0.20$
4	$0.20 < D_0 \leq 0.25$
5	$0.25 < D_0 \leq 0.30$
6	$0.30 < D_0 \leq 0.35$
7	$0.35 < D_0$

と表すことができる³⁾。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 1 & (m = i \text{ の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} = 1 & (m = j \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立すると考える。さらに、表記の便宜上、

$$\begin{aligned} &\prod_{s=i, \neq m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \\ &= \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \end{aligned}$$

と簡略化する。また、 π_{iI} に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\pi_{iI}(z) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{ij}(z) \quad (i = 1, \dots, I-1) \quad (11)$$

なお、マルコフ劣化モデルを用いれば、アセットマネジメントのためのリスク管理指標を導出できる。すなわち、当該レーティングにはじめて到達した時点から、劣化が進展して次のレーティングに進むまでの期待期間長（以下、レーティング期待寿命と呼ぶ）は、生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \tilde{F}_i(y_i) dy_i \quad (12)$$

と表される⁴⁾。ここで、指数ハザード関数を用いた生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ が式(7)で表されることに留意すれば、レーティング期待寿命は次式で表される。

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_i y_i) dy_i = \frac{1}{\lambda_i} \quad (13)$$

式(13)を用いることにより、初期時点からの経過年数と土木施設の平均的なレーティングとの対応関係を求めることができる。このような対応関係を「劣化曲線」と呼ぶこととする。

4. 適用事例

(1) データベースの概要

3. で述べたマルコフ劣化モデルを、NEXCO 各社が管理する高速道路舗装に適用する。本研究で用いたデータは、高速道路総合技術研究所が実施した舗装耐荷力調査の結果であり、FWD を用いたたわみ量調査が実施されている。対象区間では複数の時間断面において調査が実施されており、調査時点から次の調査時点に至

表-3 データベース詳細

路盤種別	表層種別	As 層厚	As 層厚	As 層厚	合計 表層種別	合計 路盤種別
		220mm 未満	220mm 以上 260mm 未満	260mm 以上		
粒状	高機能舗装 I	1,273	890	732	2,895	3,333
	高機能舗装 II	187	0	0	187	
	密粒	156	46	49	251	
セメ安	高機能舗装 I	668	742	542	1,952	2,390
	高機能舗装 II	0	36	0	36	
	密粒	85	167	150	402	
合計 (As 層厚別)		2,369	1,881	1,473	5,723	

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。このような考え方によりデータベースを整備したところ、モデル推定に用いたサンプル数は 5,723 サンプルとなった。本適用事例では、FWD を用いたたわみ測定により得られる損傷指標 D_0 に基づいて健全度を定義し、高速道路舗装の劣化を評価する。ただし、 D_0 は、重錘の載荷点直下のたわみ量 (mm) を表す。損傷指標 D_0 を離散化し、健全度を定義したものを表-2 に示す。健全度は 7 段階に分けられ、ランク数が大きくなると損傷指標 D_0 も大きくなり、舗装構造の劣化が進んでいることを表す。また、健全度 7 は使用限界を意味している。

本適用事例で用いるデータベースをマルコフ劣化モデルに適用する前に、データベースの 1 次分析を実施する。本データベースが所有している舗装諸元データとして、1) 表層種別、2) 路盤種別、3) アスファルト層厚 (以下 As 層厚)、4) FWD 調査の実施回数、5) 道路舗装の供用年月日、などがある。これら舗装諸元データのうち、現在供用している高速道路だけでなく、新たに敷設した高速道路の劣化予測を実施する際にも有用であると考えられる 1)~3) の舗装諸元に関して、サンプルデータを分類した。表層に用いられる表層用混合物は、高機能舗装 I 型用混合物、高機能舗装 II 型用混合物、密粒度アスファルト混合物 (以下それぞれ、高機能舗装 I、高機能舗装 II、密粒) の 3 つに分類される。路盤の種類としては、粒状路盤とセメント安定処理路盤 (以下それぞれ、粒状、セメ安) の 2 つに分類される。また、As 層厚は連続値ではなく、層厚が 220mm 未満、220mm 以上 260mm 未満、260mm 以上と 3 つの段階に分けられている質的データである。データベースをこれらの組合せ、18 通りに分類して整理したものを表-3 に示している。また、これらのサンプルすべてに対して、設計時に利用した T_A の値が得られている。

上記データを用いてマルコフ劣化モデルを推定した。図-1 には、説明変数として T_A 値のみを採用したモデルの推定結果から作成した劣化曲線を示している。

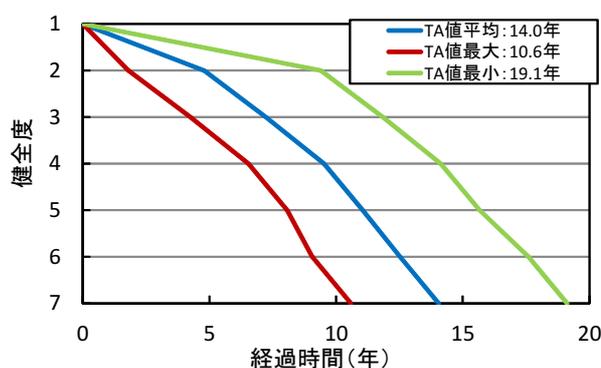


図-1 劣化曲線 (説明変数として T_A 値を採用)

5. おわりに

本研究では、アスファルト舗装の構造設計に関する妥当性を検討する一つの材料として、舗装の劣化過程を、蓄積されている点検データから統計的に評価した。本研究の結果は、現在アスファルト舗装の構造設計手法として原則的に用いられている T_A 法の問題点と向き合い、 T_A 法を改良していくべきであることを示している。当然のことながら、本研究の結果は、 T_A 法の妥当性を検討するための一つの材料であるため、早急な見直しを要求するものではないが、 T_A 法を用いた高速道路のアスファルト舗装設計が開始されてから 30 年以上が経過し、十分な点検データが蓄積された今、 T_A 法を改良すべき時期に差し掛かっているのではないかと考えられる。なお、推定結果に関する詳細な分析は、本発表時に報告させていただきたい。

参考文献

- 1) 中日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 舗装編、2012。
- 2) 阿部頼政：アスファルト舗装の構造設計における考え方、アスファルト、Vol.20, No.113, pp.5-13, 1977。
- 3) 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.68-82, 2005。
- 4) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990。
- 5) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000。