

## 高速道路の舗装における補修の影響と舗装の層厚を考慮した層別耐荷力評価

大阪大学大学院工学研究科  
(株)高速道路総合技術研究所  
大阪大学大学院工学研究科  
京都大学経営管理大学院  
大阪大学大学院工学研究科

学生会員 ○荒木 駿  
正会員 風戸崇之  
正会員 貝戸清之  
正会員 小林潔司  
学生会員 田中晶大

### 1. はじめに

現在、日本の高速道路の大部分はアスファルト舗装で敷設されている。高速道路の土工部のアスファルト舗装は層状の構造になっており、道路の表面から順に、表層、基層、上層路盤、下層路盤によって形成されている。東日本高速道路、中日本高速道路、西日本高速道路（以下、NEXCO）の管轄の高速道路では、表層から上層路盤までは、アスファルト舗装によって一体的に敷設され、アスファルト層（以下、As層）と呼ばれている。NEXCOでは高速道路上の各地点においてFWD（Falling Weight Deflectometer）調査を実施し、そのデータを蓄積している。FWD調査は路面に重錘を落下した時のたわみ量を、重錘落下地点からの距離ごとに設置された複数のたわみセンサーで測定することにより、舗装各層の耐荷力を間接的に測定することを目的とする。舗装の耐荷力は一般的に道路が使用される年数が長くなるほど低下していくが、その低下の過程は様々な要因によって変化する。本研究ではその要因の一つである舗装の厚さの違いによる耐荷力低下の過程の違いを、FWD調査データを使用し、パフォーマンスカーブおよび供用開始時点における余寿命分布で表現する。これにより、舗装の補修戦略において重要な舗装の厚さの決定に有用な知見を提供する。その際に、補修の影響により耐荷力が回復した調査データに対し、補正率を用いてデータの補正を行う操作をする。以下、2で連続量劣化ハザードモデル、3で実証分析を通して本研究の有用性を確認する。

### 2. 連続量劣化ハザードモデル

社会基盤施設の劣化を表現するモデルに田中等<sup>1)</sup>の加速劣化ハザードモデルがある。加速劣化ハザードモデルでは、劣化速度において個々の社会基盤施設の異質性を表現するが、社会基盤施設ごとに定義されたハザード関数が交差しないことを前提としている。本研究で用いる連続量劣化ハザードモデルは、加速劣化ハザードモデルを一般化したものとして踏襲する。連続量劣化ハザードモデルでは、地点 $i$ （ $=1, \dots, I$ ）について、劣化過程の進行を表す劣化ハザードモデルを、指標を $x_i$ として、

$$x_i = \exp(-B_i) f(t_i, \beta) \quad (1)$$

$$B_i = \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}' + \sigma w_i \quad (2)$$

と定式化する。ここで、 $\beta$ はベースライン関数 $f$ の未知パラメータのベクトルであり、 $\mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'$ は特性変数項を、 $\sigma w_i$ は誤差項を表す。誤差項の $w_i$ が標準ガンベル分布に従うとした場合、指標 $x_i$ に到達するまでの実寿命 $t_i$ の条件付き分布を表す確率密度関数は、

$$\begin{aligned} \tau(t_i | x_i, z_i) &= \frac{df/dt_i}{\sigma f} \exp \left\{ -\exp \left( -\frac{\ln f - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\ln f - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。式(3)を用いることにより、観測データ $\Xi_i = (\tilde{x}_i, \tilde{t}_i, \tilde{z}_i)$ が与えられた際の尤度関数を定式化できる。本研究では特性変数によりアスファルト層厚を区別する。さらに、補修された後にFWD調査が行われた地点における調査データにおいては、補正率 $\xi_j$ を用いて、観測された指標値 $\tilde{x}_i$ を、

$$\tilde{x}_i = \xi_j \cdot \bar{x}_i \quad (4)$$

に補正し、 $\tilde{x}_i$ を用いて推計を行う。ただし、 $j$ （ $=1, \dots, n$ ）は補修特性を表しており、補修層や補修回数を考慮し、 $n$ 種類の補修特性に分類して $\xi_1, \dots, \xi_n$ を設定する。これを用いて尤度関数は、

$$\begin{aligned} L(\Xi_i, \beta, \theta, \sigma, \xi) &= \prod_{i=1}^I \prod_{h=1}^H \frac{df/dt}{f\sigma} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -\exp \left( -\frac{\ln f - \ln x_h^i - \ln \xi_j - \mathbf{z} \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\ln f - \ln x_h^i - \ln \xi_j - \mathbf{z} \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

と表現できる。ここで $h$ （ $=1, \dots, H$ ）は地点 $i$ における調査回数を表し、 $\xi$ は $\xi_1, \dots, \xi_n$ を要素とするベクトルを表す。なお、式(5)中においては $\xi_j$ のみを表記しているが、 $\Pi$ によって確率密度関数を乗じることにより、尤度関数の式の中に $j=1, \dots, n$ のすべての $\xi_j$ が存在する

**Key Words** : falling weight deflectometer, 舗装耐荷力, 舗装構造

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 工学研究科 E4 棟 332 号室 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

ことに注意されたい。本研究においてはマルコフ連鎖モンテカルロ法によりモデル推計を行い、推計されたパラメータを用いてマネジメント指標を導出する。地点*i*において、経過時間 $t_i$ の時点で指標値が $x_i$ に達していない確率を表す生存関数 $St$ は、

$$St(t_i|x_i, z_i) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left( -\frac{\ln f - \ln x_i - z_i \theta'}{\sigma} \right) \right\} \quad (6)$$

と表され、 $t_i$ の時点において管理水準  $X$  に到達するまでの余寿命が  $T$  である確率を表す余寿命分布 $\tilde{F}_i$ は、

$$\tilde{F}_i(T|X, t_i) = \frac{St(t_i + T|X, \bar{z}_i)}{St(t_i|X, \bar{z}_i)} \quad (7)$$

と表現できる。

### 3. FWD データの適用

NEXCO 管轄の高速道路において実施され、蓄積された FWD 調査データを使用し、推計を行う。FWD の指標としては、 $D_0 - D_{90}$ 、 $D_0 - D_{150}$ 、 $D_{90} - D_{150}$  の 3 つを用いる。これらはそれぞれ  $As$  層、舗装全層、下層路盤の耐荷力を表す指標として NEXCO で用いられている<sup>2)</sup>。また、補修特性としては、供用開始から補修までの経過年数、補修から FWD 調査までの経過年数、補修層、補修回数などの観点から 48 種類に分類し、補正率 $\xi_1, \dots, \xi_{48}$ を設定する。この補正率を用いて、式(5)から尤度関数を導出することができる。ベースライン関数と特性変数項内のパラメータおよび補正率は、マルコフ連鎖モンテカルロ法による反復計算によってそれぞれのパラメータの事後分布の統計量を導出することにより求める。また、 $D_0 - D_{90}$ 、 $D_0 - D_{150}$ 、 $D_{90} - D_{150}$  の各指標の管理水準としては、それぞれ NEXCO 内で一般的に 250, 350, 80 に設定されている。ただし $D_0 - D_{90}$ 、 $D_0 - D_{150}$ 、 $D_{90} - D_{150}$  の各指標に用いる値は、FWD 調査において計測された値 (単位:mm) に $10^3$ 倍を乗じた値を使用する。推計されたパラメータを用いてパフォーマンスカーブと各マネジメント指標を導出することができる。図-1 に  $As$  層厚ごとの各指標におけるパフォーマンスカーブを、図-2 に供用開始時点における余寿命分布を掲載する。パフォーマンスカーブにおいては、それぞれの特性変数ごとの平均的な耐荷力低下過程を表現するために、確率変動項 $w_i$ の値として標準ガンベル分布の期待値であるオイラー数 ( $\gamma = 0.5722 \dots$ ) を使用している。図-1 からは、 $As$  層厚が 18cm, 20cm の地点の耐荷力低下の過程は同一の傾向を示し、25cm の地点よりも耐荷力の低下がかなりはやく進行することがわかる。また図-2 からは、指標ごと、 $As$  層厚ごとに供用開始時点における、ある経過年数後の余寿命確率が異なることから、 $As$  層、舗装全層、下層路盤の各層において、 $As$  層厚ごとに採用すべき維持補修戦略が異なることがわかる。

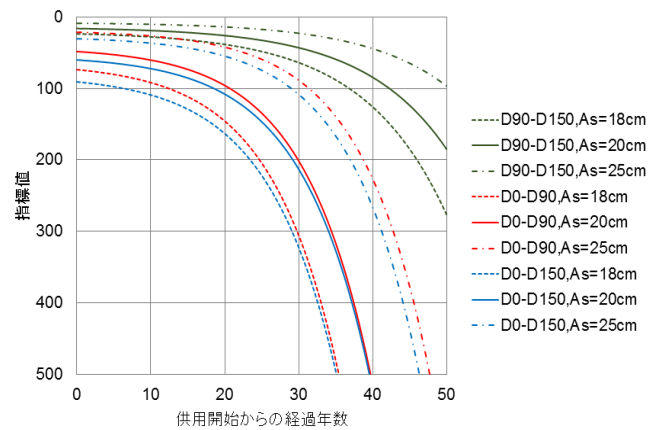


図-1 各指標のパフォーマンスカーブ

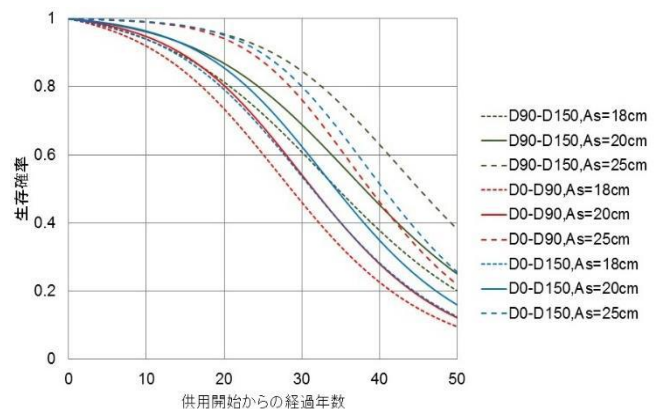


図-2 供用開始時点における余寿命分布

### 4. おわりに

本研究においては、FWD 調査によって得られたたわみ量データを用いて高速道路におけるアスファルト舗装の各層の耐荷力低下の過程を統計的に予測し、 $As$  層厚ごとにパフォーマンスカーブと余寿命分布で表現した。その過程において、補修の行われた後に計測されたデータの指標値については、観測されない補修の効果を加味するために補修の方法に同一の傾向がある補修特性ごとに補正率を設定し、補正された指標値を使用して推計を行った。今後の課題としては、補修後の舗装耐荷力の回復度に関する力学的な知見の蓄積が必要である。本研究では各補修特性の補修効果を変数として設定したが、実際の補修効果が力学的な観点から明らかになれば、より詳細な分析を行うことが可能になる。

### 参考文献

- 1) 田中尚, 藤森裕二, 貝戸清之, 小林潔司, 安野貴人: 加速劣化ハザードモデル: コンクリート中性化予測への適用, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.3, pp.329-341, 2010.
- 2) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): 調査要領, P.3-14, 2016.