

第VI部門

FWD 調査データを用いた高速道路舗装の層別耐荷力評価

大阪大学大学院工学研究科	学生会員	○笹井晃太郎
大阪大学大学院工学研究科	学生会員	水谷大二郎
株式会社高速道路総合技術研究所	正会員	風戸崇之
大阪大学大学院工学研究科	正会員	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

国内の高速道路は老朽化が進み、効率的に維持管理が行われることの重要性が高まっている。経年劣化による高速道路舗装の内部損傷事例が報告されている現況を鑑みると、今後は深部の層を含めた舗装構造全体の維持管理手法の構築が必要である。本研究では、そのような舗装補修設計手法の確立を最終目標とし、その基礎的研究としてアスファルト舗装の標準舗装構成における各層の劣化予測を行う。その際、Falling Weight Deflectometer (FWD) によるたわみ量調査から間接的に評価される舗装の耐荷力に着目し、その低下過程を連続量を用いた劣化ハザードモデルで記述する。耐荷力の時間推移をハザードモデルにより議論することで、期待寿命の算出やリスクマネジメント指標などの、舗装構造各層の劣化過程を相対的に評価する方法論を提案する。以下、2. で本研究の基本的な考え方を述べ、3. で実証分析を通し方法論の有用性を検証する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) FWD 調査データと劣化管理指標

舗装構造の耐荷力に関しては、FWD 調査などの非破壊試験により間接的な評価が行われている。図-1は標準舗装構成の断面図である。図中の D の添え字はFWD調査でたわみ量を測定するセンサーの載荷点からのセンチメートルでの水平距離である。載荷された荷重は舗装内を円錐状に伝播し、それぞれのセンサーにより観測されるたわみ量は、異なる層のたわみに由来する。この考え方に従い、たわみ量によって定義される損傷指標を劣化管理指標と考え、 $D_0 - D_{90}$ がAs層、 $D_0 - D_{150}$ が舗装全層、 $D_{90} - D_{150}$ が下層路盤、 D_{150} が路床の強度を示す損傷指標と定義する。

(2) 連続量を用いた劣化ハザードモデル

本研究では加速劣化ハザードモデル¹⁾を一般化した劣化ハザードモデルを用いる。

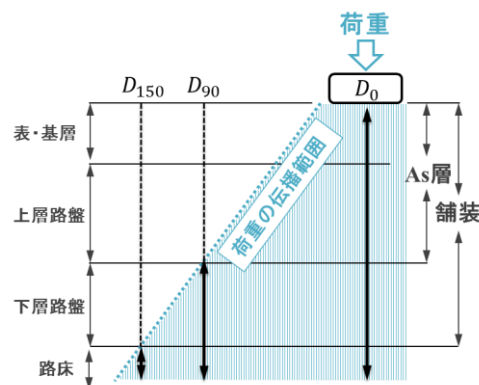


図-1 荷重の分散とFWD 調査で得られるたわみ量

対象とする道路区間 i ($i = 1, \dots, I$) において連続量で表現される損傷指標を x_i 、敷設時点、あるいは直近の補修時点からの経過時間を t_i と表す。劣化の進行過程を

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

$$B_i = \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}' + \sigma w_i \quad (1b)$$

と定式化する。ここで、 B_i は劣化特性の異質性を反映する指標であり、式(1b)に示すように特性変数項 $\mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'$ と誤差項 σw_i の和で表せる。式(1b)において、 $\mathbf{z}_i = (z_i^1, \dots, z_i^M)$ は道路区間 i の劣化に影響を及ぼす特性変数ベクトル、 $\boldsymbol{\theta} = (\theta^1, \dots, \theta^M)$ はパラメータベクトル、 w_i は道路区間 i に固有な劣化要因を表す確率誤差項、 σ は偏差パラメータを表す。また、 $f(t_i, \beta)$ はベースラインの劣化過程を表す劣化モデルであり、 t_i に関して単調増加関数である。また、 $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_N)$ はベースラインモデルを特徴づける未知パラメータベクトルである。ベースラインモデルには力学的モデルによる理論的曲線を許容するが、本研究で対象とする舗装耐荷力の時間変化のように、採用できる力学モデルが存在しない場合、フレキシブル関数を用いて統計的に推定する。

3. 実証分析

(1) 適用データの概要

適用するデータは、全国的高速道路の中から舗装構成を加味した上で無作為に抽出された 48 の路線に対して 2006 年から 2014 年に行われた FWD 調査データである。

(2) ベースラインモデルと劣化特性カテゴリ

筆者等の知る限り、舗装耐荷力に関して連続量を用いた劣化ハザードモデルのベースラインモデルとして採用できる理論的曲線は存在しない。本研究では、多項式関数、べき乗関数、指数関数、ワイブル分布関数の 4 つの関数形をベースラインモデルの候補として採用し、AIC に基づき指数関数モデル： $f(t_i, \beta) = \beta_1 \beta_2^{t_i} + \beta_3$ をベースラインモデルとして選定した。

評価単位毎の異質性を表す劣化特性には、地域特性（一般地域または積雪寒冷地域）と路盤種別（粒状路盤またはセメント安定処理路盤）を考慮した。2 つの特性間の交互作用を考慮し、4 つの劣化特性カテゴリを設けた。推定された未知パラメータの値から損傷指標によって表現された舗装耐荷力のパフォーマンスカーブを図-2 に示すように算出した。

(3) 余寿命指標

連続量を用いた劣化ハザードモデル：(1a) (1b) により、劣化特性 z_i を有する道路区間 i の、実経過時間 t_i に関する生存関数は、

$$S_i(t_i | x_i, z_i) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{\ln f(t_i, \beta) - \ln x_i - z_i \theta'}{\sigma} \right) \right\} \quad (2)$$

と表される。このとき、道路区間 i が経過時間 t_i に劣化管理指標の管理水準 $\underline{x}$ に到達するまでの余寿命が τ 以上となる余寿命指標は、式(2)の生存関数を用いて

$$\tilde{F}_i(\tau | \underline{x}, T_i) = \frac{S_i(T_i + \tau | \underline{x}, z_i)}{S_i(T_i | \underline{x}, z_i)} \quad (3)$$

と表される。図-3 は、図-2 のパフォーマンスカーブの中で一般地域かつ粒状路盤のカテゴリに属する 4 つのカーブについて、式(3)を用いて、供用から 10 年経過した時点での道路区間の余寿命分布を表したグラフである。横軸は 10 年経過時からの経過年数、縦軸は道路区間が管理水準に到達していない確率を表している。なお、本研究では既往研究²⁾を参考に管理水準を表-1 のように設定している。

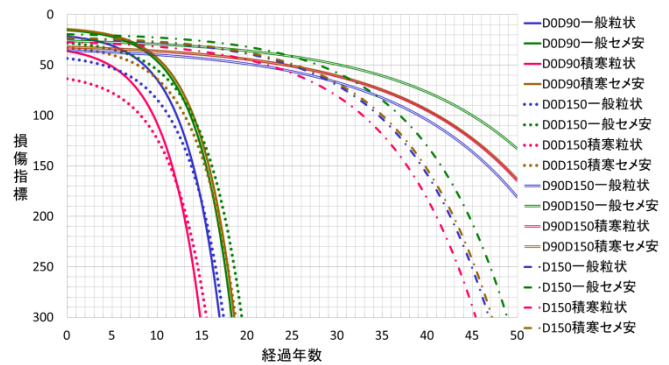


図-2 全指標パフォーマンスカーブ

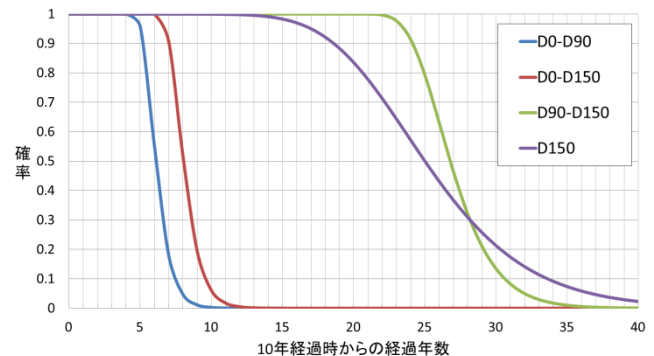


図-3 余寿命分布

表-1 各損傷指標の管理水準

損傷指標	強度を示す範囲	管理水準
$D_0 - D_{90}$	As層	250
$D_0 - D_{150}$	舗装全層	350
$D_{90} - D_{150}$	下層路盤	80
D_{150}	路床	100

4. おわりに

本研究では、連続量を用いた劣化ハザードモデルを採用し、FWD 調査によって得られたたわみ量データから舗装各層の耐荷力の低下過程の統計的予測を行った。

一方で、今後の課題として、①力学的劣化過程モデルに関する研究の蓄積、②異なる構成を持つ舗装の劣化予測を行うことによる舗装耐荷力の普遍的知見の獲得、③本研究で提案された余寿命指標などのリスクマネジメント指標のインフラ会計情報への変換、をあげることができる。

【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) 大井明, 宮崎文平, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司, 山口清人: 定期的な FWD 調査データを用いた高速道路舗装の劣化予測, 土木学会論文集 E1, Vol.70, No.2, pp.11-25, 2014.