

1. はじめに

路面性状調査により膨大な量の路面性状値が蓄積されつつある。しかしながら、これらの路面性状データは各年に実施されている補修事業において、事故の危険性を有する補修必要カ所を選定するなど、短期的な維持管理に利用されるにとどまっている。そこで本研究では、蓄積された膨大な路面性状データを用いて、数十年の管理年数を想定した中長期的な維持管理施策の検討を行う。具体的には1) 目視点検データを用いた統計的劣化予測モデルである混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用し、路線レベルの精緻な劣化予測を行う。2) 上記の劣化予測結果を用いて、路線毎に最適な補修戦略を選択し、対象全体における維持管理の効率化を図る。3) 様々な維持管理体制を想定した確率的シミュレーションによる、リスク評価及びLCC分析を行う。

2. モデルの概要

(1) 混合マルコフ劣化ハザードモデル

近年、高速道路舗装の維持管理において、蓄積された膨大な路面性状調査データを用いて統計的劣化予測を行う研究が多くなされているが、それらは対象とする道路網全ての平均的な劣化過程を表現するにとどまっている。そこで、本研究では混合マルコフ劣化モデルを用いた路線レベルの劣化予測を行った。

同モデルでは路線 k ($k=1, \dots, K$) に固有なハザード率の変動特性を表す異質性パラメータ ε_k を導入する。このとき、路線 k の健全度 i ($i=1, \dots, I-1$) における混合ハザード率を、

$$\lambda_i^{lk} = \tilde{\lambda}_i^{lk} \varepsilon^k \quad (1)$$

と定義する。ここで、異質性パラメータがガンマ分布から抽出された確率標本であると考え、さらに異質性パラメータ ε がハザード率の期待値が基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i$ に一致するように分布していると考え、平均1、分散 $1/\phi$ のガンマ分布を仮定する。その場合のマルコフ推移確率は

$$\tilde{\pi}_{ij}^k(z^k) = \sum_{s=i}^j \frac{\phi^\phi}{(\tilde{\lambda}_s^k z^k + \phi)^\phi} \prod_{m=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_m^k}{\tilde{\lambda}_m^k - \tilde{\lambda}_s^k} \quad (2)$$

と表される。いま、 K 個の路線の劣化現象が互いに独立であると仮定すれば、全調査情報サンプルの劣化推移パターンの同時生起確率密度を表す尤度関数は、

$$\mathcal{L}(\theta, \Xi) = \prod_{i=1}^{I-1} \prod_{j=i}^I \prod_{k=1}^K \prod_{l_k=1}^{L_k} \left\{ \tilde{\pi}_{ij}^{l_k}(\bar{z}^{l_k}, \bar{x}^{l_k}; \theta) \right\}^{\delta_{ij}^{l_k}} \quad (3)$$

と表現される。また異質性パラメータに関して、路線 k に属する L^k 個の調査サンプル ξ^{k^l} が得られた場合、これら L^k 個の調査サンプルが得られる異質性パラメータ ε_k に関する同時生起確率密度関数（部分尤度）は、

$$\rho^k(\varepsilon^k; \hat{\theta}, \xi^k) \propto \prod_{l_k=1}^{L^k} \left\{ \sum_{m=i(l_k)}^{j(l_k)} \psi_{i(l_k)}^m(\tilde{\lambda}_i^k(\hat{\theta})) \exp(-\tilde{\lambda}_m^k(\hat{\theta}) \varepsilon^k \bar{z}^{l_k}) \right\}^{\delta_{(l_k)j(l_k)}^{l_k}} \left\{ (\varepsilon^k)^{\phi-1} \exp(-\phi \varepsilon^k) \right\} \quad (4)$$

と表される。

(2) 確率的シミュレーション

上記の劣化予測結果から、乱数発生により管理年数 Y 年のひび割れ率健全度 i ($i=1, \dots, I$)及び、IRI健全度 j ($j=1, \dots, J$)に関する劣化、補修の供用サイクルを表すサンプルパスを P 回発生させた。その際のライフサイクルコストは

$$LCC = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sigma_d^{p,y}}{P} \quad (5)$$

と表現される。ただし $\sigma_d^{p,y}$ は観測データの最小単位長に対する補修単価、 $\delta_d^{p,y}$ は補修要否ダミーであり

$$\delta_d^{p,y} = \begin{cases} 1 & (i_d^{p,y} = I \text{ or } j_d^{p,y} = J) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (6)$$

である。またこの場合の保全率 S を以下のように定義し安全性の評価指標として用いている。

$$S = \sum_{p=1}^P \frac{1}{P} \left(1 - \frac{\sum_{d=1}^D \delta_d^{p,y}}{D} \right) \quad (7)$$

表-1 健全度ランク

健全度	ひび割れ率 (%)	IRI (mm/m)
1	$0 \leq Cr < 1$	$IRI < 1$
2	$1 \leq Cr < 5$	$1 \leq IRI < 2.0$
3	$5 \leq Cr < 10$	$2.0 \leq IRI < 3.0$
4	$10 \leq Cr < 15$	$3.0 \leq IRI < 4.0$
5	$15 \leq Cr < 20$	$4.0 \leq IRI < 5.0$
6	$20 \leq Cr$	$5.0 \leq IRI < 6.0$
7	-	$6.0 \leq IRI < 7.0$
8	-	$7.0 \leq IRI$

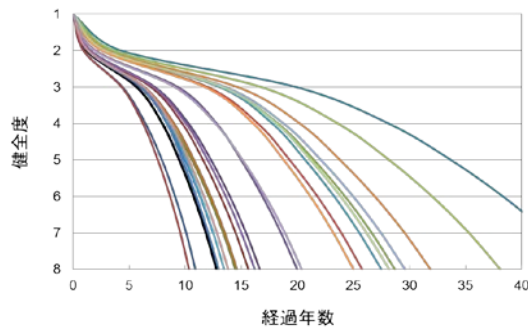


図-1 路線毎の劣化予測結果 (IRI×高機能舗装)

3. 適用事例

(1) 適用事例の概要

上記の理論を NEXCO 西日本関西支社（以下、関西支社）の管轄する高速道路に対して適用した。11 事務所、30 路線に対して行われた 7 年間の路面性状調査で得られたひび割れ率、IRI に関するデータを用いている。サンプル数は総数 40 万以上に及ぶ。今回、サンプル数が十分得られていること、舗装の表層種別の違いにより、舗装の劣化過程が大きく異なることが経験的に知られていることなどを踏まえ、データベースを評価指標、表層種別により 4 つに分割した。表 1 にひび割れ率、IRI それぞれの健全度の定義を示す。

(2) 推計結果

図-1 に一例として、IRI×高機能舗装に関する路線毎の劣化予測結果を示す。平均的な劣化傾向を表すベンチマーク曲線（黒線）に注目すると、期待寿命は約 13 年となっている。以上の劣化予測結果からシミュレーションにより、LCC、リスクの評価、を行った。なお、補修単価、補修実施のタイミングについては関西支社で実際に用いられて基準を採用している。

図-2 には現状の維持管理施策下における将来時点のシミュレーション結果を示している。LCC は現在関西支

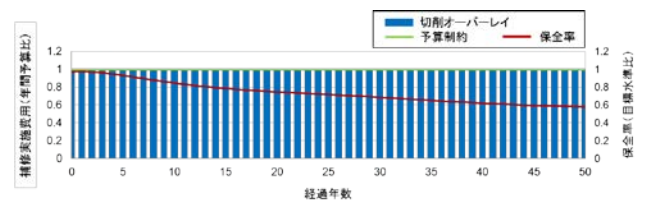


図-2 シミュレーション結果（現状の施策）

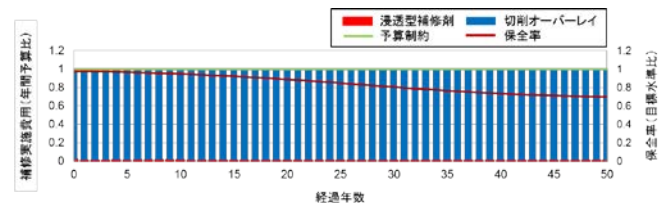


図-3 シミュレーション結果（予防保全導入）

社で割り当てられている年間予算額とシミュレーション上での支出額の比を用いて表す。また保全率に関しても関西支社内の目標値との比を用いて表す事とする。同図より、現状の施策を継続した場合、予算不足から 50 年後には目標水準比が 0.58 まで低下することがわかる。これを受け、本研究では近年、試行されている浸透型補修剤による予防保全を導入した場合の検討をおこなった。そのシミュレーション結果を図-3 に示す。同図より、50 年後の目標水準比は 0.70 であり、予防保全を導入することで、約 0.1 の改善が見られた。予防保全工法の補修単価は従来の補修工法である切削オーバーレイの 2% 程度であることから、同図からは実施規模が読み取りづらい。しかし、劣化の進行を遅らせることから、費用・リスクの低減に貢献していると考えられる。

4. おわりに

本研究では路線単位の精緻な劣化予測の結果から、シミュレーションを実施、LCC、リスク評価を行う事で、安全面、経済面の両面から維持管理施策の評価を行った。結果、予防保全の導入により費用、リスクともに低減することが可能である。

【参考文献】

- 1) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸 清之, 小林 潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 857-874, 2008.
- 2) (社) 日本道路協会: 道路維持修繕要綱, 1978.