

実測データを用いた舗装マネジメント支援ツールの開発

○奥尾 展保¹・秋田 直樹²

¹ 関東地方整備局 関東道路メンテナンスセンター 技術第一課 (〒330-0843 埼玉県さいたま市大宮区吉敷町1-89-1タカラビル2階)

² 関東地方整備局 関東道路メンテナンスセンター 技術第二課 (〒330-0843 埼玉県さいたま市大宮区吉敷町1-89-1タカラビル2階)

舗装管理の実績を通じた舗装マネジメントの重要性が指摘されているが、実際には対処療法的な維持管理に留まっている場合が少なくない。これは、計画と実際の避けられない乖離のために措置の優先順位が最適化されず、計画通りに進められないことに起因する。一方、舗装の管理実務においては、現状把握と劣化予測のために多量のデータが蓄積されつつあるが、その情報収集や分析に多くの労力を費やしている。本稿では、舗装メンテナンスを最適化することを目指して、アスファルト舗装の路面性状の実測データをもとにした劣化予測手法、および管理実務における舗装マネジメントを支援する方策について提案する。

キーワード アスファルト舗装, 路面性状, 劣化予測, 修繕計画, マネジメント支援ツール

1. 背景と目的

現在、インフラの維持管理・更新に関わる職務の多様化、複雑化、職員の減少を背景として、修繕等計画の策定、設計、新技術導入検討などに十分な時間を費やせていない。その結果、一部の成果品質の低下や修繕等計画の不備といった問題が顕在化しつつある。また、長期的なライフサイクルコストの縮減を目的としたマネジメントの重要性が指摘されているが、実際には対処療法的な維持管理に留まっている場合が少なくない。これは、計画と実際の避けられない乖離のために、措置の優先順位が最適化されず、計画通りに進められないことに起因する。見方を変えれば、将来の健全性を正確に予測できれば、劣化予測にもとづく管理シナリオを描き、劣化状態に応じた具体的な措置を計画に落とし込むことができる。それができれば、リソースに考慮した適切な管理目標を設定してムリ・ムラ・ムダのない維持管理が実現できるはずである。

一方、現在の維持管理段階で得られる各種データの取り扱い、データベース構築やビッグデータの活用といった多量のデータを取得して蓄積していくような傾向にある。しかし、情報収集や分析、特に多量なデータから有益な情報を抽出、加工して実務に活かすことに多くの労力を費やしている。また、劣化過程には不確実性が少なからず含まれているため、不測の早期劣化や想定外の箇所での損傷が発生する事象も確認されている。

本検討は、舗装メンテナンスの最適化を目指し、関東地方整備局管内(以後、管内)の国道管理事務所を対象に、道路管理実務における合理的なマネジメントを実現するための支援ツールの開発を目標とする。本稿では、**図-1**のフロー図

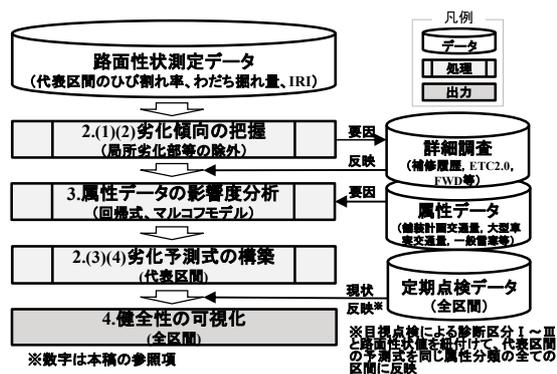


図-1 劣化予測検討の流れ

に示す通り、管内の代表区間で得られた路面性状測定データを使って、2.ではアスファルト舗装の将来の健全性を予測する方法、3.では劣化過程に含まれる様々な劣化要因の影響度を分析した結果、4.以降では将来の健全性を可視化するマネジメント支援ツールの概要と課題、最後に今後の活用方策について考察する。

2. 劣化傾向の把握

(1) 使用する実測データ

検討対象範囲は、管内の管理区間延長約 2,427km である。このうち路面性状測定は、管内の国道事務所、路線の劣化傾向を網羅的に把握できるように代表区間 121 箇所、延長 110.7km/車線を無作為に抽出し、H12 年度より概ね4年間隔で継続して実施している。

劣化傾向の把握は、路面性状測定で得られるひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性の3指標のうち、主にひび割れ率(以後、実測データ)に着目した。この理由は、舗装の経年劣

化に対する感度が比較的高く劣化進行過程を捉えやすかったこと、表層からの雨水浸透を防ぎ路盤以下を傷めない観点からもひび割れ率に着目することは適切であると判断した。

(2) データセット

劣化予測に用いる実測データは、無処理のままだと舗装構造や使用環境などの様々な劣化要因の影響を受けて大きくばらつく。このため、その影響度に応じた劣化傾向を把握し評価できるように表-1に示す属性分類に大別した。この属性に着目した理由は3(1)項にて詳述する。

表-1 路面性状測定データの属性分類

| 分類No.* | 大型車実交通量 [台/日・方向] | 地域特性 |
|--------|-------------------------|-------|
| 1 | 1000~3000 未満 (N6 相当) | 一般 |
| 2 | | 積雪寒冷地 |
| 3 | 3000 以上 (N7 相当) | 一般 |
| 4 | | 積雪寒冷地 |

※計画交通量区分は全てN7(N6は別途)

次に、実測データに内在する外れ値は、図-2に示す処理手順により除外して、劣化予測に用いるデータセットを作成した。具体的には、まず現場制約などを受けたと思われる説明のつかないデータを除外した。例えば、実測データから劣化進行量(劣化速度)を評価するために前回と最新の2時期の測定データが必要になるが、前回測定以降に補修がなされているのに補修履歴が記録されていないなどの記録漏れを含むデータである。次に管内の一般的な劣化傾向を把握するため、既往調査で判明している局所劣化部²⁾、例えば交差点付近や地下埋設物などの特殊条件下にあるデータは除いた。最後に劣化予測式の精度向上のため、データのばらつきから統計的に信頼性に欠けるデータは除外した。

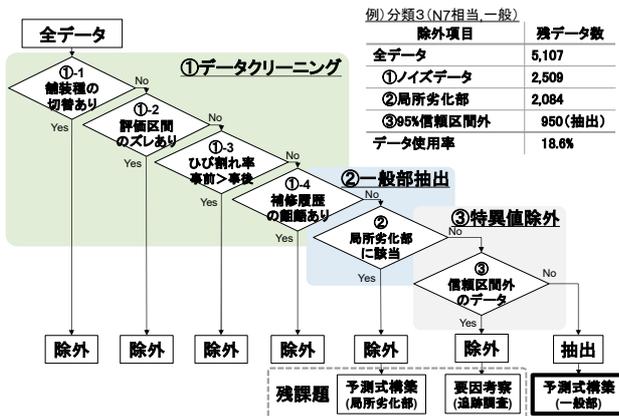


図-2 劣化予測に用いるデータの抽出¹⁾より作成

(3) 劣化予測式の構築

劣化予測手法は、回帰分析による方法(以後、回帰式)を用いた。過去に実施した補修・修繕時期を調べた上で、実測データを経過年ごとにプロットし、それを最小二乗法により二次関数に近似させて回帰式を構築した。回帰式を用いた理由は、一つに簡便であること。二つにデータ数が少ない場合にも推定可能で、継続調査によりデータ数を増やせば予測の信頼性を高めることができること。三つに過年度の検討に

おいて、統計的劣化予測モデルより回帰式を用いた予測の方が実測データとの整合性が高かったためである²⁾。

管内の代表区間の実測データを用いて構築した劣化予測式の例を図-3に示す。図中には外れ値(①)除外前後の予測式を併記している。除外の有無により、ひび割れ率20%、舗装点検要領³⁾に示す健全性IIに到達するまでの期間に約8年の誤差が生じていることを確認できる。

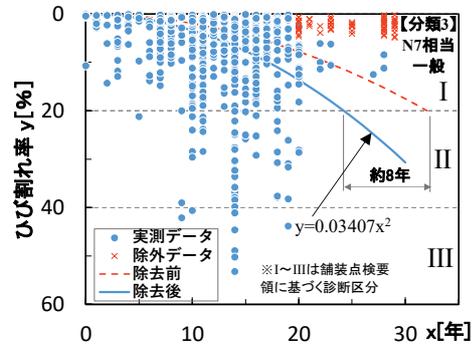


図-3 外れ値除外前後の劣化予測式

(4) 劣化予測式の区間推定

劣化予測式は実測データをクリーニングして構築しているが、除去しきれない不確実性が内在し、使用するデータのばらつきによって予測の信頼性に差が生じる。このため、劣化予測にあたっては、一つの確定的な予測値を与えるよりも、ある幅をもった推定値で示した方が合理的であると考え、回帰式の区間推定⁴⁾の考え方を適用し、以下式により求めた。

$$y = f(x) \pm t(n-2, \alpha) \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right) \hat{V}_\varepsilon} \quad (a)$$

$$\hat{V}_\varepsilon = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i))^2}{n-2} \quad (b)$$

ここに、 y は被説明変数(健全性)、(a)式の第1項は回帰式 $f(x) = \hat{a} + \hat{b}x^2$ 、ただし、 x は説明変数(経過年)、第2項は推定しようとする回帰式の誤差項、 n はデータ数、 $t(n-2, \alpha)$ は自由度 $n-2$ 、有意水準5%の t 値、 x_i は実測データ、 \bar{x} は平均値、 \hat{V}_ε は回帰式の誤差分散である。

劣化予測式を区間推定した結果は図-4の2本の破線(以後、推定曲線)で示す。推定曲線は、回帰式の誤差項が反映されて、実線で示す回帰式より求めた劣化曲線に対して

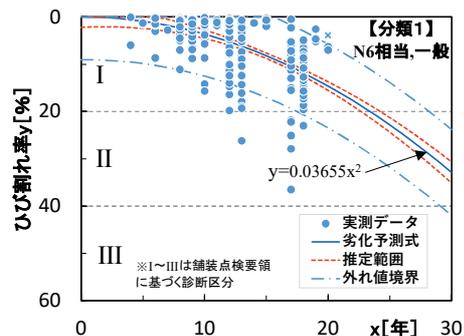


図-4 劣化曲線の変動範囲

上振れ、下振れしていることを確認できる。この破線に囲まれた範囲が劣化曲線の変動する範囲である。よって、予測結果の活用にあたっては、この振れ幅に応じた複数のシナリオを用意することで、管理実務における措置の選択肢が増えてマネジメントしやすくなると考えられる。なお、図中の一点破線は、実測データのばらつきに対する95%信頼区間である。

3. 属性データの影響度

舗装の劣化進行過程は、舗装構造や使用環境などの様々な劣化要因の影響を受ける。ここでは舗装種類、地域特性、大型車交通量と沿道状況に着目し、それら影響因子(以後、属性データ)が劣化速度に与える影響度を分析した。

(1) 回帰式を用いた分析

回帰式による属性データの影響度分析は、回帰式の劣化速度を表す回帰係数に着目し、2つの異なる属性データ群の母平均に有意差が生じているか否かを検定して影響の有無を評価した。具体的には、まず全データを属性分類したあと、各属性の回帰式を構築する。次に、各属性データ群の回帰係数の平均と分散を求め、t検定により評価した。有意水準は舗装の実測データのばらつきに考慮して $\alpha=10\%$ とした。

検定の結果、属性分類のうち大型車交通量区分と積雪寒冷地の地域特性が劣化速度に「影響を及ぼしていないとはいえない」ことが統計的にわかった(表-2)。なお、舗装種および沿道環境については有意な差は認められなかった。

表-2 各属性の平均の差の検定結果

| 属性分類 | | n* | 平均 | 標本分散 | t値 | 自由度 | p値 | 有意差* |
|----------|--------|-----|-------|-------|--------|-------|-------|------|
| 舗装種 | 密粒度 As | 69 | 0.080 | 0.014 | -0.847 | 83.6 | 39.9% | なし |
| | 排水性 Po | 136 | 0.114 | 0.099 | | | | |
| | 総計 | 67 | 0.097 | 0.055 | | | | |
| 大型車交通量区分 | N6 | 65 | 0.137 | 0.096 | 1.836 | 85.0 | 7.0% | あり |
| | N7 | 71 | 0.061 | 0.017 | | | | |
| | 総計 | 136 | 0.097 | 0.055 | | | | |
| 地域特性 | 一般 | 87 | 0.072 | 0.062 | -1.711 | 118.7 | 9.0% | あり |
| | 積雪寒冷 | 49 | 0.139 | 0.040 | | | | |
| | 総計 | 136 | 0.097 | 0.055 | | | | |
| 沿道状況 | 市街地 | 75 | 0.094 | 0.077 | -0.158 | 125.8 | 87.5% | なし |
| | 平地・山地 | 61 | 0.100 | 0.080 | | | | |
| | 総計 | 136 | 0.097 | 0.055 | | | | |

*nはデータ数、有意水準 $\alpha=10\%$ 、p値 $<10\%$ で有意差あり

(2) 統計的劣化予測モデルを用いた分析

統計的劣化予測モデル⁵⁾では、測定間隔の異なる実測データの2つの時点間の劣化進行過程に規則性を見出し、確率的に状態遷移時期を推定する。具体的には、2つの時点間の劣化状態(健全性)が遷移する時期の確率密度関数は指数ハザード関数にしたがう。つまり、状態遷移は時間に依存せず指数分布にしたがう一定の生起確率で遷移すると仮定して状態遷移確率を非集計的に推計する。さらに、劣化速度を表すハザード関数には、実測データの測定間隔に加えて、例えば大型車交通量や地域特性などの属性を内包させて、条件の相違に応じた劣化予測を行える。また平均的な劣化速度に対する乖離の程度を異質性として定量評価できる

ようになっている。詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

統計的劣化予測モデルによる属性データの影響度分析は、推計した劣化予測モデルの劣化速度に関わるパラメータ値に着目して、劣化速度に影響を及ぼしているか否かを統計的に判定した。その結果、劣化過程が健全性II以上となった段階では、大型車交通量区分、ゼロクロス(以後ゼロクロス)と沿道状況が劣化速度に「影響を及ぼしていないとはいえない」ことが統計的にわかった(表-3)。なお、回帰式を用いた分析においても概ね同様の結果を得ていることから、統計的劣化予測モデルを用いた分析方法の妥当性を確認することができた。

表-3 属性データが劣化速度に与える影響度

| 劣化過程 (健全性の遷移) | 舗装種 (As, Po) | 大型車交通量 区分(N6, N7) | 地域特性 (ゼロクロス日数) | 沿道状況 (市街地か否か) |
|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|------------------|
| 1⇒2 (I⇒I) | 0.59 | 0.52 | 0.46 | — |
| 2⇒3 (I⇒I) | — | — | 0.55 | — |
| 3⇒4 (I⇒II) | — | — | 1.60 | 0.51 |
| 4⇒5 (II⇒III) | — | 0.23 | 1.43 | 0.52 |
| 5⇒6 (III⇒III) | — | 0.64 | 0.80 | 0.44 |

*数値は混合マルコフ劣化ハザードモデルにおける各属性データの推定パラメータ値。数値「あり」は統計的に有意と判定(Geweke検定、信用区間90%)。数値が大きいほど劣化速度に与える影響度は大きい。

次に、全ての劣化過程で影響の見られたゼロクロス日数に着目して、属性データと異質性パラメータをマッピングした(図-5)。カラーマップはゼロクロス日数を色の濃淡で示し、管内全域の平均的な劣化速度に対する異質性パラメータを路線上にプロットしている。その結果、ゼロクロス日数が多くなる山間部では、異質性パラメータ値が全体平均(1.0)より高くなる傾向にある。特に、パラメータ値が2.0を超える区間Aでは、平均的な劣化速度と比較して健全性IIIに到達するまでの期間に約5年の差が生じる結果となった。

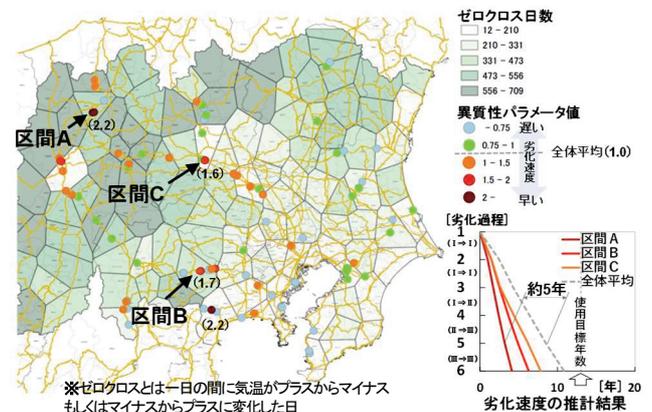


図-5 ゼロクロス日数と異質性パラメータ

4. 健全性の可視化

構築した劣化予測式をもとに、現在から5年先までの健全性を地図上に可視化した(図-6左下)。具体的には、目視点検による診断区分とひび割れ率を紐付けて、代表区間の属性分類ごとに構築した劣化予測式を管内の全区間に適用した。この結果は、実測データと点検データにもとづいた予測結果ではあるが、除去しきれない不確実な影響要因が内在しているため、あくまでマネジメントを支援する参考情報の位置付けになる。管理実務における当面の使い方の例

としては、近い将来、修繕コストが高くなる可能性の高い区間を抽出して補修時期を検討する。あるいは補修・修繕時期を見過ぎさないようにするといった使い方が考えられる。

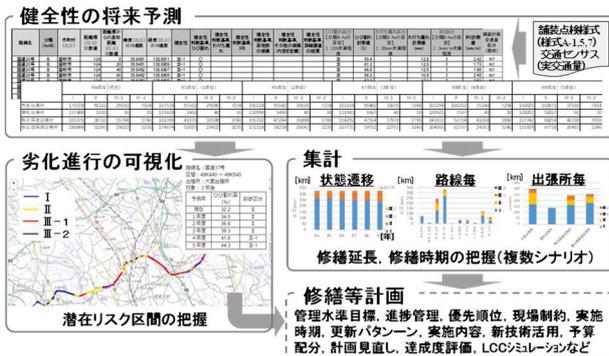


図6 マネジメント支援ツールの出カイメージ

5. まとめ

検討にあたり工夫した点と主な成果を以下にまとめる。

- (1)蓄積された多量のデータから的を射たデータを速やかに抽出できるように、外れ値の処理手順に判断基準を設けてルーチン化した。
- (2)管理実務において生じる予算や時期の制約に応じて柔軟な対応をとれるように、劣化予測に用いる回帰式の推定精度に考慮して振幅(範囲)をもった劣化予測式を構築し、その範囲に応じて複数の補修・修繕の更新パターンを提示できるようにした。
- (3)舗装の使用環境などの属性データが劣化過程に与える影響度を分析した結果、大型車交通量と地域特性、特に積雪寒冷地のゼロクロスによる影響が比較的大きいことを明らかにした。
- (4)目標達成とリソースを両立させた修繕等計画の策定とその達成度評価の改善サイクルを構築できるように、管内の全区間の現状から5年先までの健全性の予測結果を地図上に可視化した。

6. 今後の課題と展望

今後の管理実務への展開にあたっては、効率的かつ計画的に舗装管理を行えるように、一般部以外の局所劣化部にも対象範囲を広げて検討する必要がある。具体的には、大型車プローブデータを活用して局所劣化部を抽出し、路面性状測定値とマッピングして劣化特性を把握する⁶⁾。その特性に応じて属性分類することで、予測精度のさらなる向上が期待できる。また、本検討では舗装表面のひび割れに着目して劣化予測を試みたが、表面の損傷のみでは早期劣化の原因がわからないことも多い。このため、わだち掘れ量、平坦性、FWDたわみ量や地下探査などの経年的なデータと組み合わせることで、工学的な検証を行って早期劣化メカニズムを解明できれば将来予測の精度はさらに高度化し、支援ツールとしての機能も高まると考える。

舗装マネジメントの合理化の観点では、図-7に示すように維持管理段階で蓄積される各種情報とそこから得た知識、それにもとづく意思決定の循環サイクル⁸⁾の質を上げる取り組みを継続することが課題である。具体的には、日々の管理行為のなかで劣化予測に必要なデータを確実に記録して、支援ツールにて予測の絶えざる見直しを行う。その結果にもとづいて補修・修繕の優先順位付けなどの修繕等計画を更新する。さらに早期劣化の原因を調査して、得られた知見のもとに管理目標などに反映する。この一連のプロセスをマネジメントサイクルに組み込めば、合理的で発展性のある舗装マネジメントシステム⁸⁾にスパイラルアップできると考える。

支援ツールの機能拡張の観点では、測定後の現状および将来予測結果の速やかな可視化の課題がある。その一方策としては、点検結果情報が一元的に格納されている「xROAD」とのデータ連携があげられる。そして、さらなる活用のためには、各々の道路管理者が路線のネットワーク機能や地域特性に応じてカスタマイズしながら使っていけるような支援ツールを志向する必要があると考えている。

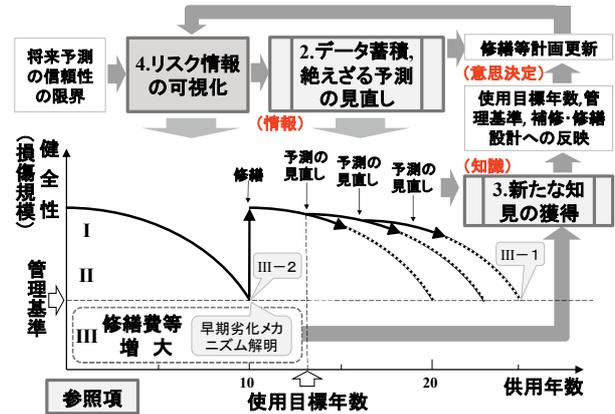


図7 マネジメント支援ツールを用いた継続的改善のサイクル

参考文献

- 1) 鈴木達朗・吉沢仁・井上浩一・中須賀聡・竹内康: 全国の直轄国道点検データを用いた劣化傾向把握と信頼性を考慮した予測結果評価, 土木学会論文集 E1, Vol.75/No.2, I_17-I_24, 2019.
- 2) 坂口浩昭・森飛翔・菊池俊明・入江健夫・植田知孝: 国道事務所毎・路線毎の代表箇所における舗装のひび割れ劣化曲線の構築と検証, 土木学会論文集 E1, Vol.76/No.2, I_153-I_160, 2020.
- 3) 国土交通省 道路局 国道・防災課: 舗装点検要領, 2017.3.
- 4) 田中秀幸・高津章子: 分析・測定データの統計処理, pp.111-121, 朝倉書店, 2014.9.
- 5) 小林潔司・中谷昌一・玉越隆史・青木一也・竹末直樹: 実践道路アセットマネジメント入門, pp.46-50, pp.218ff, コロナ社, 2019.4.
- 6) 田中志和・植田知孝・菊池省二・黒澤稔: プローブデータを活用した舗装の局所劣化箇所の抽出, 第34回日本道路会議, 2021.11.
- 7) 玉越隆史: 性能保証型インフラアセットマネジメント, p.267-271, コロナ社, 2022.11.
- 8) (公社)日本道路協会: 舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針, p.18, p.47, 2018.9.