

下水道のアセットマネジメントに関する研究

熊本大学大学院助教 正会員 藤見俊夫
熊本大学大学院教授 正会員 尾原祐三

熊本大学大学院 学生員 廣瀬健康
熊本大学大学院教授 正会員 松田泰治
熊本大学大学院教授 正会員 柿本竜治

1. 下水道事業が抱える問題

日本の下水道事業では、施設の老朽化が進展している。特に、管渠は昭和 40 年代以降急速に整備が進み、現在、その総延長は約 41 万 km に達する。法令の耐用年数 50 年を超過する管渠は全体の約 2%だが、実際に老朽管に起因する道路の陥没事故は、全国で年間 4,000 件以上も発生している。今後、老朽化が進めば多額の調査・更新費用が必要になると予想される。しかし一方で、自治体の下水道事業の財政は悪化している。多くの自治体は、下水道施設の更新・補修費用の大半を企業債で賄っているのが実情である。限られた財源の中で、より効率的に維持管理を行わなければならない。

上記の問題への対策として注目されているのがアセットマネジメント (Asset Management : AM) である。AM とは、対象資産の将来の劣化状態を予測し、中長期的な維持補修計画の最適化を行う手法である。金融分野で発達した手法だが、近年、土木施設の維持管理に適用する動きが加速している。例えば、堀らは、下水処理施設の劣化過程をハザードモデルで表現し、マルコフ連鎖モデルにより最適点検・補修政策を記述し、推定を行っている¹⁾。ただし、管渠などの地下埋設施設に関する先行研究は少ない。地下埋設施設は点検自体が困難な為、点検データが少ないのが原因だと考えられる。そこで、本研究は、下水道管渠の劣化予測を行い、維持管理計画の最適化を試みる。ただし、本研究は、本概要の投稿時点において最適化の結果を得るに至っていない。よって、ここでは劣化予測の結果に留める。

2. モデルの定式化

(1) 劣化予測モデルの概要

本研究では、マルコフ連鎖モデルにより劣化過程を記述する。図 1 に示すように、管渠の劣化度を段階的に表し、時間経過に伴う劣化度間の推移を確率的に表現する。劣化度は状態変数 i ($i = 1, \dots, 3$) で記述する。

値が大きいくほど劣化が進行していることを表す。これは、国土交通省が発行する下水道長寿命化支援制度に関する手引き (案)²⁾ の評価法に対応させている。劣化度間の推移確率は、マルコフ推移確率と呼ぶ。例えば、時点 n における状態変数を X_n とすると、時点 t で劣化度 1 の管渠が、次の時点 $t + 1$ に劣化度 2 に進展するマルコフ推移確率は、

$$\text{Prob}[X_{t+1} = 2 | X_t = 1] = \pi_{12} \quad (1)$$

と表される。補修がない限り劣化は進行するので、

$$\text{Prob}[X_{t+1} = j | X_t = i] = 0 \quad (i > j) \quad (2)$$

(1), (2) をまとめて、マルコフ推移確率行列を得る。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ 0 & p_{22} & p_{23} \\ 0 & 0 & p_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、補修がない場合、 p_{33} は吸収状態を表すので、

$$p_{33} = 1 \quad (4)$$

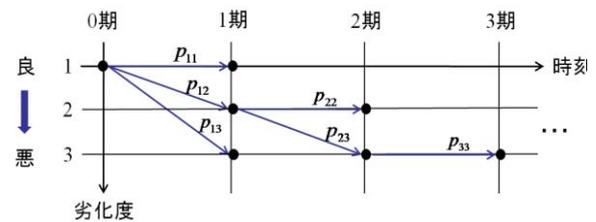


図 1 時間の経過に伴う劣化度の推移

(2) マルコフ推移確率の定式化

マルコフ推移確率の導出・推定に関する議論はいくつかの文献^{1),3)} に詳しい。今、劣化の進行速度が、使用時間 y_i に依存しないと仮定する。この時、ハザード関数 $\lambda(y_i)$ は常に一定値 θ_i をとる。すなわち、

$$\lambda(y_i) = \theta_i \quad (5)$$

となる。さらに、ハザード関数(5)を規定するパラメータ θ_i を、以下のように定義する。

$$\theta_i^k = \mathbf{x}^k \boldsymbol{\beta}_i \quad (6)$$

ここで、 k はサンプル番号、 \mathbf{x}^k は特性変数 x_m^k ($m = 1, \dots, M$) の行ベクトル、 $\boldsymbol{\beta}_i$ は未知パラメータ $\beta_{i,m}$ ($m = 1, \dots, M$) の行ベクトルを表す。 θ_i^k を用いて、劣化度間の推移確率を以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= \exp(-\theta_1 Z) \\
 p_{12} &= \frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta_2} \{-\exp(-\theta_1 Z) + \exp(-\theta_2 Z)\} \\
 p_{13} &= 1 - (p_{11} + p_{12}) \\
 p_{22} &= \exp(-\theta_2 Z) \\
 p_{23} &= 1 - p_{22} \\
 p_{33} &= 1
 \end{aligned} \tag{7}$$

(3) 未知パラメータの推定方法

推移確率(7)が、点検データと極力一致するような未知パラメータ β を推定する。推定には、最尤推定法を用いる。全管渠の劣化現象が互いに独立であると仮定し、同時生起確率密度を表す対数尤度関数を最大化し得る最尤推定値 $\hat{\beta}$ を求める。計算アルゴリズムには、ニュートン法を用いる。

3. 適用事例

(1) 適用事例の概要

劣化予測モデルに、熊本市上下水道局が3年前から実施している目視点検およびTVカメラ調査により得られた点検データを適用する。熊本市では、昭和23年より下水道管渠整備が始まり、現在その総延長は2,234kmに達する。調査済みの管渠延長は、そのうちの約16.6kmに過ぎず、今後も点検データの蓄積が必要である。点検データには、各種異常や経過年数の他、管径、管頂深、管種などの情報が含まれる。本研究で扱うモデルには、特性変数 x^k として劣化に影響する管渠の位置的・物理的特性値を組み込むことができる。本研究では、 $x_1 = 1$: 定数項、 x_2 : 管径、 x_3 : 管頂深を採用した。また今回、対象管種はヒューム管に限定する。理由は、他の管種のサンプル数が少なすぎることで、管種の違いによる劣化の進行速度への影響が、特性変数に組み込むには大き過ぎると判断したため。以上の条件を踏まえた上で利用可能なサンプルの総数は355個である。

(2) 推定結果

パラメータの推定結果を表1に示す。同表より、管径の特性値の係数は非負値であり、管頂深の特性値の係数は負値である。このことから、管径が大きい管渠ほど劣化が早く、深い位置に埋設している管渠ほど劣化の進行が遅いことが分かる。一般的に、合流式下水

道の管渠は分流式に比べ管径が大きいことから、合流式管渠の点検・補修を優先する必要があると言える。図2には、推定したマルコフ推移確率と経過年数の関係を示す。同図は、将来にわたる管渠の劣化度の推移としても見る事ができる。経過年数の増加に対して劣化速度が低下しているのは、式(5)において指数ハザードモデルを採用しているのが原因である。

4. まとめ

実際の劣化現象を考えた時、施設供用直後からの経過年数に応じて劣化速度が上がる場合が少なくない。適用モデルについては、操作性も考慮した上で検討する。また、今後の予定として、本紙に示した結果に基づいて維持管理計画の最適化を行う。

パラメータ	推定値	t値	p値	
定数項	$\beta_{1,1}$	10.4277	11.980	0.0000
	$\beta_{2,1}$	1.5528	2.684	0.0073
管径	$\beta_{1,2}$	2.7675	1.970	0.0489
	$\beta_{2,2}$	0.4454	0.409	0.6828
管頂深	$\beta_{1,3}$	-6.6847	-13.016	0.0000
	$\beta_{2,3}$	-1.0375	-3.349	0.0008

表1 パラメータの推計結果

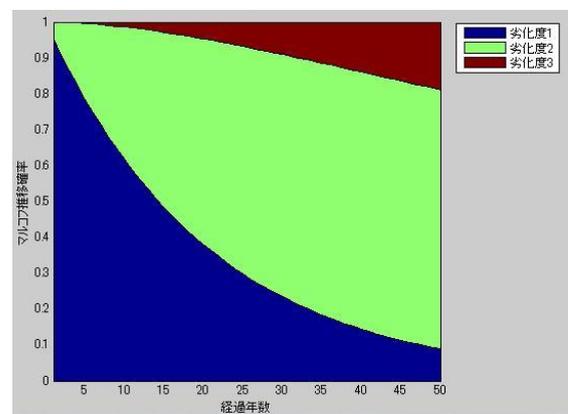


図2 劣化度の推移の予測結果

参考文献

- 堀倫裕, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 下水処理施設の最適点検・補修モデル, 土木計画学研究・論文集 Vol. 25, no. 1, 2008.9
- 国土交通省 都市・地域整備局下水道部: 下水道長寿命化支援制度に関する手引き (案)
- 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測の為のマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/I-73, 69-82, 2005.10