

上水道の持続可能な管路更新期に関する分析

05001455 筑波大学 ＊川辺 怜 KAWANABE Ren
01009480 筑波大学 大澤 義明 OHSAWA Yoshiaki

1. はじめに

我が国では道路や橋梁などに加え水道の維持管理が喫緊の課題である [1][2]。特に、地下に埋設されているため、その老朽化に関しては市民との共有が進んでおらず、他のインフラと比較して危機感が薄い。自治体の財政は厳しくなり、そして土木職での人手不足、働き方改革から、自治体業務の平準化が求められている。

本稿の目的は、単純なモデルを通して、現状（令和 2 年度）の管路網を維持する前提で管路更新の時期を予測し、地域間比較することにある。全国 1,388 水道事業体のデータ [3] の管路経年 3 区分データを活用し、比較可能な数値化を行う。大まかな区分ではあるが、網羅性が高く全国で比較できるメリットがある。

なお、管路長から更新費用の算出も可能ではあるが、工事費は地域性に依存するため安定しない。現状と比べることができる構成比で分析を進める。

2. モデル

2.1. 管路の破損時期

上水道の破損までの期間が次に示すワイブル分布 $f(\tau)$ で表現されている [1]：

$$f(\tau) = \alpha m \tau^{m-1} \exp(-\alpha \tau^m), \quad (0 \leq \tau). \quad (1)$$

式 (1) の累積分布関数を $F(\tau)$ とすると、 τ までの生存確率 $1 - F(\tau)$ 、 τ まで生存している条件下での τ での破損確率 $\frac{f(\tau)}{1-F(\tau)}$ は

$$1 - F(\tau) = \exp(-\alpha \tau^m), \quad (0 \leq \tau), \quad (2)$$

$$\frac{f(\tau)}{1 - F(\tau)} = \alpha m \tau^{m-1}, \quad (0 \leq \tau). \quad (3)$$

大阪市の実例 [1] から、 $m \approx 1.90$ 、 $\alpha \approx 2.55 \times 10^{-4}$ と、ワイブル分布のパラメータが推計されている。 $m > 0$ から、経過とともに破損確率 $\frac{f(\tau)}{1-F(\tau)}$ が上昇する。これらの数値を式 (2) に代入すると、 $F(40) \approx 0.242$ 、 $F(50) \approx 0.345$ 、 $F(60) \approx 0.450$ となる。この数値を組み込んだワイブル分布を活用し、マルコフ連鎖モデル [2] を構築する。

2.2. 管路の更新時期

上水道管路について国が定めた法定耐用年数は 40 年であるが、越える管路も数多い。そこで、管路経年データ [3] の 3 分類（0–20 年、20–40 年、40 年以上）との整合性を図るため、20 年スパンで各管路が第 I 期、第 II 期、第 III 期の 3 個の状態を移動するマルコフ連鎖モデルを構築する。

本研究では、次の仮定を設定する。(a-1) 上水道管路が破損した場合、直ぐに更新する。(a-2) 60 年超の場合、20 年かけて更新する。これら仮定から、第 I 期及び第 II 期での破損確率 q_1 と q_2 を導入して、次の推移確率行列を構成する：図 1 参照。

$$P = \begin{pmatrix} q_1 & 1 - q_1 & 0 \\ q_2 & 0 & 1 - q_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

第 I 期と第 II 期の中間時点での値 $F(10)$ 、 $F(30)$ を用いて、確率 q_1 と q_2 を次のように定めた。

$$q_1 = F(10) \approx 0.020, \quad (5)$$

$$q_2 = \frac{F(30) - F(10)}{1 - F(10)} \approx 0.131. \quad (6)$$

第 I, II, III 期の構成比を $x \equiv (x_1, x_2, x_3)$ とする。ただし、 $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ 。推移確率行列 (4) に数値 (5) 及び (6) を代入し、 $xP = x$ を解くと、定常分布 $x = (0.353, 0.346, 0.301)$ が得られる。更新率は 0.353 で 1/3 より 2% 高いレベルで一定となり、最も安定する。0.353 は 20 年間の値であり、どこかの年では 1.76% 以上の更新が必要なが理解できる。

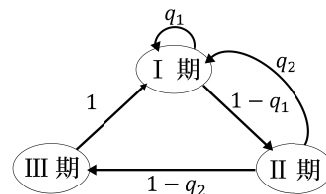


図 1: 推移確率行列

3. 実証

全国 1,388 水道事業体の令和 2 年度時点での 3 区分構成比を三角グラフに示すと、図 2 のようになる。正三角形の上(右, 左)の頂点に近いほど、0-20 年、20-40 年、40 年以上での構成率が高い。更新率が常に一定の定常分布を□で示す。図 2 から、多くの事業体が定常分布と比べ右下に位置し構成比が 20-40 年に偏っていることが確認できる。

推移確率行列(4)をもとに 2020 年から 20 年後及び 40 年後の、管路経年の分布を推定する。2020-2040 年での更新率は、 xP のベクトル第一成分、2040-2060 年での更新率は、 xP^2 のベクトル第一成分で与えられる。第 I 期、及び第 II 期で更新が必要な管路割合が 40%, 50%, 60%, 70% となる構成比を、図 2 の点線で示せる。これらの領域にある水道事業体では、管路更新が集中してしまう自治体である。財源投資の平準化、専門人材の安定雇用という観点から課題があると言えよう。

これらの分析から 2020-2040 年(2040-2060 年)での 20 年間で 86 事業体(481 事業体)が 50%を越え、延長ベースで全国の 3.4%(39.4%)にも達する。関東地方を抽出し地図化すると、図 3 及び図 4 のようになる。これらの図から、更新時期に関する規模と地域的偏りという濃淡を読み取れる。特に、2020-2040 年では関東地方周辺部で、2040-2060 年では関東地方全体で、水道管路の更新が必要なが理解できる。図 4 で示す結果は、1990 年代の日米構造協議による内需拡大のため、公共投資が集中したことを反映していると言えよう。

4. おわりに

本研究では、既存の管路経年データに単純なマルコフ連鎖モデルを適用することで、各事業体の水道の更新時期を可視化した。本研究は、PwC コンサルティング合同会社と筑波大学社会工学域との共同研究の一環で実施した。

参考文献

- [1] 田中尚・Le Thanh Nam・貝戸清之・小林潔司：上水道管路の最適予防取替モデル(2008)：土木計画学研究・講演集(CD-ROM), 38, 133.
- [2] 田巻拓郎・中根進(2009)：マルコフ連鎖を用いた管きょ修繕・改築量の推計, 下水道研究発表会講演集, 46, pp.559-561.
- [3] 公益社団法人日本水道協会(2022)：令和 2 年度水道統計(施設・業務 編)。

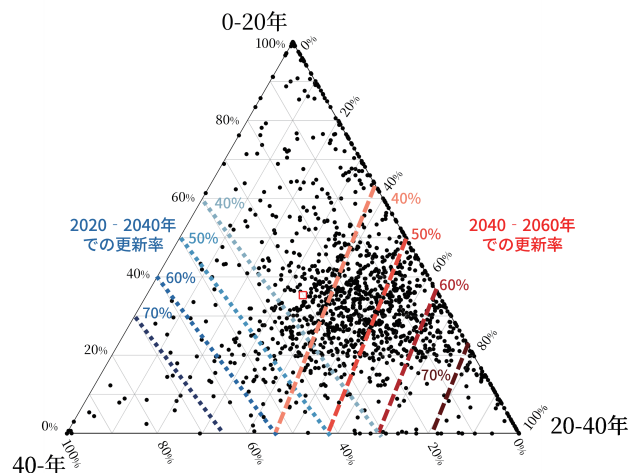


図 2: 全国各事業体の管路経年構成比

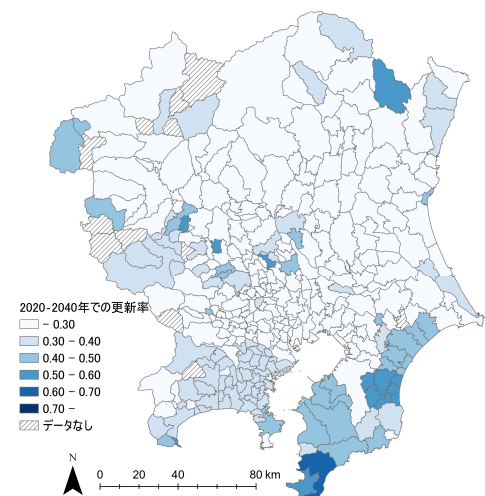


図 3: 2020-2040 年での管路更新率

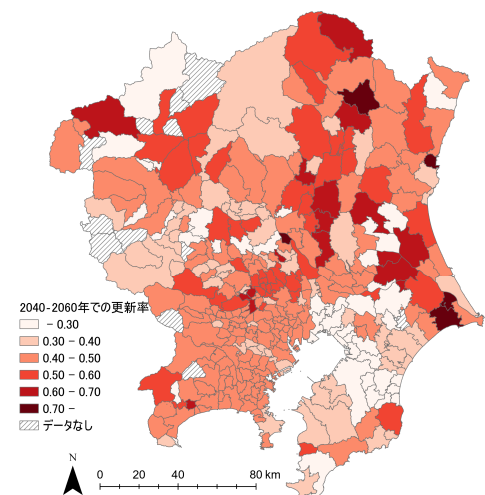


図 4: 2040-2060 年での管路更新率