

ワイブル分布を用いた下水道管渠の劣化予測モデルの構築

熊本大学大学院 学生員○田代達郎

熊本大学大学院 正会員 藤見俊夫

熊本大学大学院 正会員 柿本竜治

1. はじめに

高度経済成長期に整備された大量の下水道の老朽化が近年目立っている。下水道管の主力であるヒューム管は昭和 40 年代以降に敷設され、現在の総延長は約 39 万 km に及ぶ。それらが法定の耐用年数である 50 年を超えようとしている今、老朽化に起因する道路の陥没事故も全国で既に年間 4,000 件以上発生している。今後さらに老朽化が進めば多額の更新費用や事故処理・補償費用が必要になると目される。一方で多くの自治体が下水道施設の更新・補修費用の大半を企業債で賄い、負債を膨らませているのも実情であり、経済的かつ効率的に維持管理を行っていく必要に迫られている。

そこで社会資本アセットマネジメントという考え方が広がっている。社会資本アセットマネジメントは、インフラストックを金融資産とみなし、安定的に良質なサービスを提供できるよう管理することで住民の都市生活に資する、則ち現在価値を高めようとするものである。劣化状況を予測し、それに沿って戦略的に維持管理を行えば大規模な補修事業は必要なくなる。しかしながら埋設された下水道の点検は容易でなく、予測に必要なデータは限られる。

下水道の劣化予測と経営戦略に堀ら¹⁾の先進的な研究があり、実際の土木行政が現場レベルで参照する国の「下水道長寿命化支援制度に関する手引き」²⁾との親和性も低くないが簡便ではない。本研究は土木行政が活用することを想定し、よりシンプルに管渠の健全度を予測できる確率モデルを構築することに主眼をおいている。

2. モデルの定式化

(1) 劣化予測モデルの概要

劣化過程を、構造物の寿命が単純な指数分布に従う仮定の下でマルコフ連鎖モデルの記述をするのが一般的だが、本研究はより汎用性のあるワイブル分布と生存時間解析学に基づいてモデルを定式化した。国土技術政策総合研究所が公開した「管渠劣化データベース」³⁾並びに、管渠の健全度を C→B→A の 3 段階で評価する国土交通省の「下水道長寿命化支援制度に関する手引き」に則っ

て整理した下水道管の劣化割合を図-1に示す。健全な管渠が徐々に減少している様子が見える。

健全度 C としての寿命と B としての寿命がそれぞれワイブル分布に従う、C と B の期間の長さは互いに独立である、劣化現象は不可逆であるという 3 つの仮定をおく。埋設後ある年数を経過して初めての点検時の劣化状態を診断する為、データは区間打ち切りとなる。そこで埋設時の初期値として C を与えると、その後の初回点検時 t において健全度 J が C, B, A である確率はそれぞれ

$$\pi_C(t) = \exp\left(-\frac{t^{m_C}}{\eta_C}\right) \quad (1)$$

$$\pi_B(t) = \frac{m_C}{\eta_C} \int_0^t \xi_C^{m_C-1} \exp\left\{-\frac{\xi_C^{m_C}}{\eta_C} - \frac{(t-\xi_C)^{m_B}}{\eta_B}\right\} d\xi_C \quad (2)$$

$$\pi_A(t) = 1 - \pi_C(t) - \pi_B(t) \quad (3)$$

と定式化できる。ただし ξ_C は C から B に遷移するまでの時間(未知数)である。 m_j および η_j はワイブル分布の形状パラメータで、推計の対象である。この形状パラメータに対し、管渠の持つ属性(変数)を組み込むことにした。

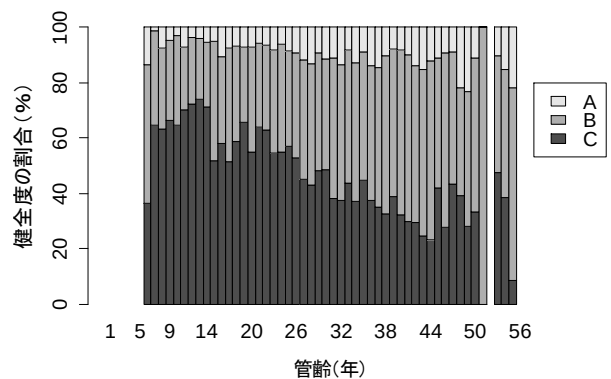


図-1 時系列の劣化割合

(2) モデルの変数について

管渠の劣化を管齢や仕様、取り巻く環境条件で予測できることが望ましいが、それらと劣化の関連性については統計的にも知られていない。そこで熊本市の点検台帳を集計したところ、マンホール近傍でクラックや破損(破損は流れ方向に平行な亀裂、クラックは垂直な亀裂を指す)が発生しやすいことを確認した[図-2]。この事実は交通量と

力の作用に相関し得る変数として内径 d [mm] と管頂深 h [m] の 2 変数を選ぶ根拠となる。それらが、内径の大きい管が分厚く強度が高いことから輪荷重の影響を受けにくくなる性質と、深い場所ほど輪荷重の影響が薄くなる土圧の性質を考慮できるからである。

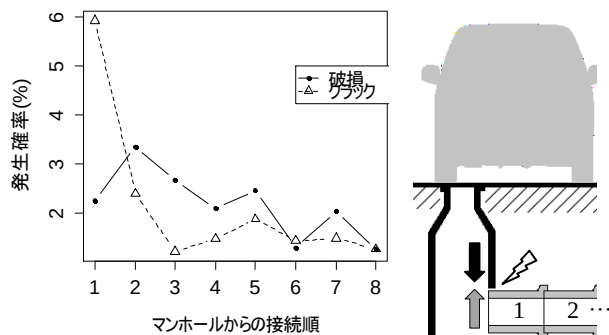


図-2 破壊の発生確率

(3) 未知パラメータの推定方法

推定に用いる観測データとして国土技術政策総合研究所が公開した「管渠劣化データベース」を援用する。データベース中の全サンプルの埋設位置は秘匿されているが、管頂深、管齢、内径と不良発生率はわかる。今回はその中からヒューム管 43,534 スパン分のサンプルを用い、確率モデル(1), (2), (3)に対して最尤推定法を用いて未知パラメータ(係数)を推計した。最適解の探索アルゴリズムには、式の形状との相性から Nelder-Mead 法を用いた。また積分は離散的に扱い、近似解として評価した。

3. 結果と考察

パラメータの推定結果をそれぞれ表-1に示す。健全度が C から B に遷移する時機(寿命 C)に関するワイブル分布の形状パラメータ η_c を次式(4)のように組み立て、他を定数とした場合に大変有意な評価を得た。このモデルは、管径に比して劣化が遅くなり、ある管頂深からずれるほど劣化が遅くなる傾向を示した。ある管頂深とは内径で決まるのだが、推計したモデルによる具体的な試算では、内径 250mm 管の健全度が C から B に遷移する時機は管頂深が 4.7m の時に最も早くなった[図-3]。

このような形になったのは、輪荷重を伝える土中の圧力球根と管の位置関係によるものと推察される。例えば典型的な圧力球根にかかる矢印上では、ある管頂深をピークに輪荷重の影響は浅いところと深いところで小さくなるだろう[図-4]。モデルはこのことを表したと予想する。

$$\eta_c = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 h + \frac{\beta_3}{h} \quad (4)$$

表-1 推計値と RMSEA

係数	推計値	標準誤差	t 値
m_C	0.7727	0.0088	48.533
m_B	-0.2936	0.0347	-13.052
η_B	2.1790	0.3002	17.886
β_1	0.0132	0.0006	11.374
β_2	0.3812	0.1955	2.1149
β_3	8.4150	0.5733	10.456
β_0	6.1121	0.8245	6.8320

RMSEA = 0.0134 < 0.05

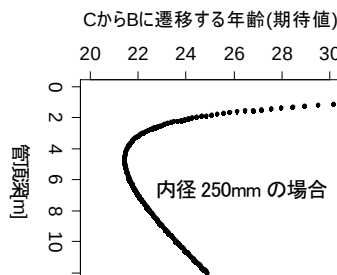


図-3 管頂深と寿命

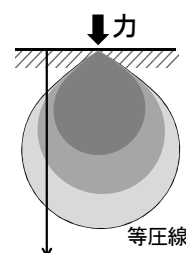


図-4 圧力球根

4. おわりに

図-5 は推計モデルを用いてモンテカルロ・シミュレーションで再現した結果で図-1 とよく近似した。この精度であれば、事前の評価だけで優先的に点検すべき地区をある程度絞ることができる。今後、交差点や管体直上の交通量、轍との位置関係を代表する変数を組み込めば、さらに詳しいモデルが得られるだろう。点検業務では周辺の状況も併せて記録し、データを蓄積していくことが求められる。

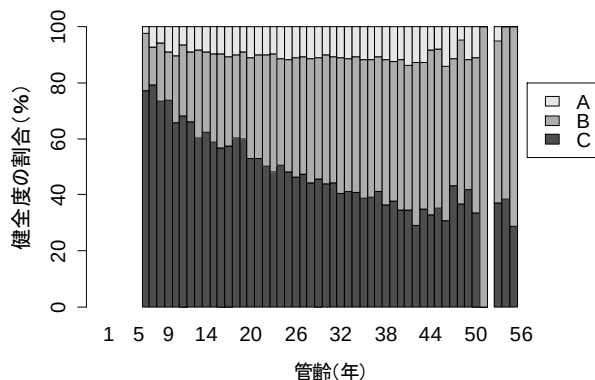


図-5 再現結果

参考文献

- 堀倫裕: 下水道施設のアセットマネジメント戦略に関する研究, 京都大学大学院博士論文, 2010.3
- 国土交通省: 下水道長寿命化支援制度に関する手引き(案), 2009.6
- 国土交通省国土技術政策総合研究所: 管渠劣化データベース, <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>