

下水道管きょ劣化予測の改善について

熊井 健人¹・加藤 亮一¹

¹ 法人準会員 仙台市建設局下水道事業部下水道調整課
 (〒980-8671 宮城県仙台市青葉区国分町 3-7-1)
 E-mail: kento_kumai@city.sendai.jp

仙台市の下水道は、総延長が 4.8 千 km を超える膨大な管きょを有しており、今後対応すべきこれらの改築事業量が事業経営を左右しかねない状況にある。布設から 100 年以上が経過した管きょもあるなど、老朽化に起因する道路陥没や汚水溢水も発生している。このような事業環境の中でアセットマネジメントの取組みを進めるにあたり、管きょのサンプリング調査を行い、回帰分析の手法により管種別・排除方式別の管きょの劣化予測式を作成した。しかし、この劣化予測式に基づき管きょの詳細調査を進めたところ、予測よりも劣化が進行していない傾向が多く認められたことから、マルコフ劣化ハザードモデルを用いた劣化予測式の見直しを行った。その結果、目標耐用年数を 17～29 年延伸できることが分かった。

キーワード：下水道、管きょ、不良率、劣化予測、マルコフ劣化ハザードモデル

1. はじめに

仙台市（以下、本市）の下水道は明治 24 年に事業を開始し、今年で 129 年目を迎えた。汚水処理人口普及率が 99.7% とほぼ概成し、まさに建設の時代から維持管理の時代へと移行した現在、これまでに整備した管きょをはじめとする膨大な下水道施設をいかに効率良く健全な状態で維持していくかが大きな課題となっている。年々増加する老朽化施設への対処が求められる一方で、予算や職員といった経営資源は減少傾向にあり、これらへの対処もまた重要な課題となっている。

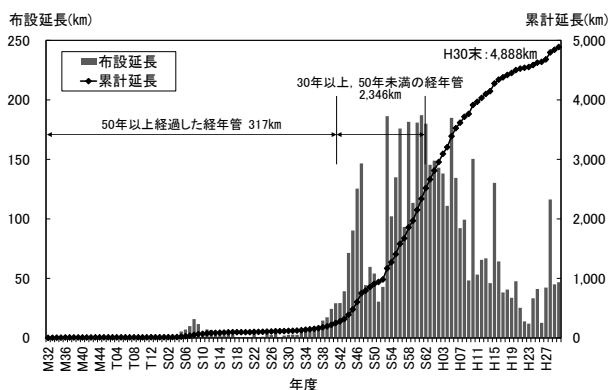


図-1 管きょの年度別布設延長・累計延長

これらの課題を包括的に解決することを目的として、本市下水道事業では平成 18 年度よりアセットマネジメントシステム（以下、AMS）の導入検討に着手し、平

成 25 年 7 月にその本格運用を開始した。

本稿では、本市下水道事業が構築した AMS のうち、最も重要な構成要素であるリスク管理に関して、管きょの老朽化リスクを表現する一項目である発生確率について述べる。具体的には、管きょの改築時期として設定する目標耐用年数の導出に用いる不良率と劣化予測式について、その考え方や見直しの経緯、内容等を紹介する。

2. 現行の劣化予測式と課題

(1) 管きょの老朽化リスク

本市の AMS では、工事等についてリスクの大小により投資の判断や優先順位付けを行うリスク管理の仕組みを採用しており、管きょの老朽化の他、設備機器の老朽化、管きょの地震（耐震性）、施設の地震（耐震性）及び市域の浸水に対するリスクを取り扱っている。リスクは図-2 に示すように影響と発生確率との積で表し、リスクレベルは高い方から順に H (High) , M (Medium) , L (Low) 及び N (Negligible) の 4 つを設定している。

管きょの老朽化リスクにおける影響には、管きょが老朽化により損壊した際に生じる下水道サービスや交通、環境などへの影響を用いている。また発生確率は、管きょの改築時期、すなわち本市が独自に設定した管きょの使用年限である目標耐用年数 (>標準耐用年数) として

| | | 発生確率 | | | | | リスクレベル |
|----|-----|------|----|----|----|----|---------|
| | | A | B | C | D | E | |
| 影響 | i | 1 | 6 | 11 | 15 | 21 | リスクレベルH |
| | ii | 2 | 7 | 12 | 16 | 22 | リスクレベルM |
| | iii | 3 | 8 | 13 | 17 | 23 | リスクレベルL |
| | iv | 4 | 9 | 14 | 19 | 24 | リスクレベルN |
| | v | 5 | 10 | 18 | 20 | 25 | リスクレベルN |

図-2 リスクマトリクス (概念図)

(2) 不良率

本市の管きよの目標耐用年数は、劣化予測式において不良率が30%となる布設後の経過年数として設定している。不良率とは、本市における管きよの劣化度合いを表す指標であり、管きよのTVカメラ調査結果により算出される。具体的には、TVカメラ調査結果から管体1本ごとの破損の程度を4つのランク(程度が大きい順にS, A, B, C)で評価(最も高い異常ランクを採用)した後、式(1)により管体ごとの異常の程度で重み付けを行い、スパン単位の劣化度合いとして導かれる。

$$\begin{aligned}
 \text{不良率}(\%) = & \frac{1.0 \times S, A \text{ ランクの管体本数}}{\text{スパン全体の管体本数}} \times 100 \\
 & + \frac{0.7 \times B \text{ ランクの管体本数}}{\text{スパン全体の管体本数}} \times 100 \\
 & + \frac{0.3 \times C \text{ ランクの管体本数}}{\text{スパン全体の管体本数}} \times 100 \quad (1)
 \end{aligned}$$

(3) 単回帰分析による劣化予測式

現行の劣化予測式は、AMSの導入に併せて実施したサンプリングTVカメラ調査の結果を用いて作成した。同調査では、管きよの布設後の経過年数だけでなく管種と排除方式を勘案した上で、統計的に信頼できるサンプル数として総延長256kmの調査を平成22~25年度までの4ヶ年をかけて実施した。

調査結果から不良率と経過年数との関係を分析し、管種別・排除方式別にデータの散布状況や相関から最も妥当と判断された近似式を劣化予測式として採用した。陶管については、分析結果から使用されている継手の規格の相違が管きよの劣化に大きく影響していると考えられたことから、目標耐用年数は定めず規格の変遷時期により改築の要否を判断することとした。

表-1 劣化予測式と目標耐用年数(現行)

| 管種 | 劣化予測式 [x:経過年数(年), y:不良率(%)] | 目標 耐用年数 | 標準 耐用年数 |
|--------------|--------------------------------|------------|------------|
| ヒューム管(合流・汚水) | $y=0.0054x^2+0.1131x$ | 65年 | 50年 |
| ヒューム管(雨水) | $y=0.0045x^2+0.0625x$ | 75年 | |
| コンクリート管 | $y=0.006x^2-0.0154x$ | 72年 | |
| 樹脂系管 | $y=0.0573x+3.0423$ | 100年以上 | |
| 陶管 | 昭和60年度以前に布設されたものを改築対象とする | | |

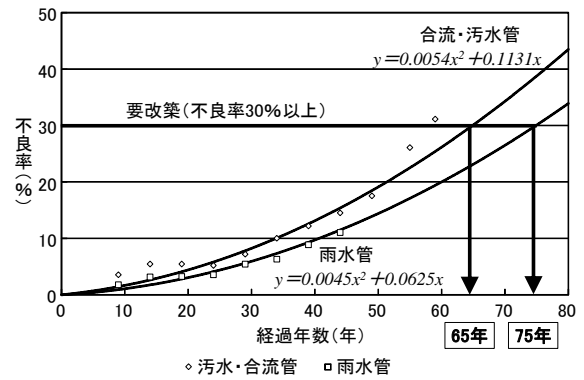


図-3 劣化予測式(現行:ヒューム管の例)

(4) 現行の劣化予測における課題

これまでの考え方で作成した劣化予測式を基に、改築時期と判断された管きよのTVカメラ調査を進めてきたが、結果は不良率が30%以上と判定されたスパンが2割程度であり、実際には予測よりも劣化が進行していない状況が明らかとなった。また、不良率算出式の特性から、管体延長が短い管種ほど不良率が低く算出されてしまう点についても改善が必要と認められた。そのため、効果的な調査による要改築管きよ抽出の更なる効率化と予算執行の一層の合理化を図ることを目的として、次期経営計画(事業実施計画)の始期である令和3年度からの適用に向け、次のとおり劣化予測式の精度向上と不良率算出式の改善を進めることとした。

3. 劣化予測式の見直し

(1) 解析モデルとその特徴

新たな劣化予測式の作成にはマルコフ劣化ハザードモデルを採用した。本モデルでは、ある時点での調査結果しかない場合でも、供用開始時の健全度を1、点検時(任意の経過年数時点)での健全度をjとすることで、マルコフ推移確率 π を推定することができる¹⁾。マルコフ推移確率 π_{ij} は、ある健全度iから時間間隔Z中に健全度jに推移する確率を表現しており、式(2)で表される²⁾。

$$\pi_{ij} = \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} \exp(-\theta_m Z) \quad (2)$$

($i=1, \dots, J-1; j=i, \dots, J$)

ただし、 $m=i, m=j$ のとき

$$\prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} = 1 \quad (m=i) \quad (3)$$

$$\prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} = 1 \quad (m=j) \quad (4)$$

とする。

ここで、 θ はハザード率であり、健全度iのスパンk

に対して式 (5) に示すハザード関数により表される。
 なお、ハザード率 θ_i の逆数は、健全度 i になった時点から次の健全度 $i+1$ に変化するまでの時間間隔を示す期待期間長にあたり¹⁾、各健全度における期待期間長の総和がスパンとしての期待寿命と言える。

$$\theta_i^k = \exp(\beta_{i,0} + \beta_{i,1}x_1^k + \beta_{i,2}x_2^k) \quad (5)$$

$\beta_{i,0}$ は複合的な要因による劣化を表す定数項であり、 x_1^k 、 x_2^k はスパン k の特性を表す変数である。 $\beta_{i,1}$ と $\beta_{i,2}$ は各説明変数の影響の度合いを表す係数である。

マルコフ劣化ハザードモデルは大阪市における下水道管きよ劣化予測への適用事例²⁾や、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研）管きよ劣化データベースへの適用事例³⁾があり、管きよ延長や管径、土被りなどが説明変数として採用されている。本市では大阪市での事例から説明変数 x_1^k に管きよ延長、 x_2^k に管径を採用することを検討した。しかし、モデル作成に使用したサンプルでは管径のデータに偏りが大きく、管径により分類を行うためにはサンプルが十分でないことと、3.(3)に示すパラメータ β の推定から結果として管きよ延長のみの説明変数となった。

(2) 使用データ

新たな劣化予測式の作成にあたっては、本市が平成27年度までに実施したTVカメラ調査の結果を使用した。サンプル数（調査済みスパン数）の観点から、管種をコンクリート系（合流・汚水）、コンクリート系（雨水）及び陶管の3つに分類して解析を行った。なお、塩化ビニル管などの樹脂系管や铸铁管等については、経過年数が短いことやサンプル数が十分でないことから、今回の劣化予測の対象としなかった。各分類のスパン数は表-2に示すとおりである。

表-2 管種別スパン数内訳

| 管種 | 全スパン数 | 調査済数 | 調査済割合 |
|-----------------|--------|-------|-------|
| コンクリート系管(合流・汚水) | | | |
| ヒューム管 | 58,292 | 5,252 | 9% |
| コンクリート管 | 965 | 293 | 30% |
| 鉄筋コンクリート管 | 469 | 28 | 6% |
| その他 | 29 | 14 | 48% |
| 不明 | 1,496 | 19 | 1% |
| コンクリート系管(雨水) | | | |
| ヒューム管 | 23,223 | 1,340 | 6% |
| コンクリート管 | 893 | 27 | 3% |
| 鉄筋コンクリート管 | 4,481 | 133 | 3% |
| その他 | 21 | - | 0% |
| 不明 | 587 | 9 | 2% |
| 陶管 | | | |
| 陶管 | 11,106 | 1,366 | 12% |

さて、2.(4)で述べたとおり、管きよの劣化度合いを示す指標として用いている不良率算出式には課題がある。例えば、20mのスパンで破損Aランクが3本の管に見つかった場合、管体延長2m（1スパンあたり管本数10

本）では不良率 $1.0 \times 3 / 10 \times 100 = 30\%$ 、管体延長1m（1スパンあたり管本数20本）では不良率 $1.0 \times 3 / 20 \times 100 = 15\%$ となる。本市では不良率30%を要改築の基準としていることから、同等の破損が見られても改築が実施されるスパンとそうでないスパンが生じることを意味する。このことは、樹脂系管やコンクリート系管に比べて管体延長が短い傾向にある陶管の不良率が、相対的に過小評価されやすく、改築が進みにくい可能性を示している。これを改善するため、陶管の不良率については、TVカメラ調査結果から得られた不良率に対して、コンクリート系管の管体延長と陶管の管体延長との比を乗じることにより不良率の補正を行い、解析に使用することとした。それぞれの管体延長については、規格値⁴⁾からコンクリート系管2.0m、陶管0.66mとし、その比は $2.0 / 0.66 = 3.03$ とした。

なお、マルコフ推移確率を推定する際の健全度の区分は不良率を基に区分しており、その対応を表-3に示す。

表-3 健全度-不良率対応表

| 健全度 | 不良率 |
|-----|--------------|
| 1 | 0%以上 5%未満 |
| 2 | 5%以上 10%未満 |
| 3 | 10%以上 20%未満 |
| 4 | 20%以上 30%未満 |
| 5 | 30%以上 100%以下 |

(3) 解析結果

指数ハザード関数のパラメータ β の推定結果は表-4に示すとおりとなった。コンクリート系（合流・汚水）、コンクリート系（雨水）、陶管のいずれにおいても、管きよ延長 x_1^k の係数にあたる $\beta_{i,1}$ の符号は負であることから管きよ延長が長いほどハザード率 θ は小さくなることがわかる。なお、管径 x_2^k の係数にあたる $\beta_{i,2}$ は全て0となったため表に記載していない。

表-4 パラメータ β 推定結果

| 健全度 (不良率) | コンクリート系(合流・汚水) | | コンクリート系(雨水) | | 陶管 | |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 定数項 | 区間距離 | 定数項 | 区間距離 | 定数項 | 区間距離 |
| | β_0 (t値) | β_1 (t値) | β_0 (t値) | β_1 (t値) | β_0 (t値) | β_1 (t値) |
| 1 (0~5%) | -3.67 (117.45) | -1.73 (11.17) | -3.71 (54.11) | -6.39 (8.69) | -3.60 (52.78) | 0.00 (3.03) |
| 2 (5~10%) | -2.46 (50.34) | -1.45 (6.33) | -2.34 (21.71) | -5.71 (5.00) | -1.71 (13.44) | -1.73 (5.81) |
| 3 (10~20%) | -3.04 (53.56) | 0.00 (2.00) | -3.17 (23.49) | 0.00 (1.07) | -2.12 (19.36) | -1.74 (6.92) |
| 4 (20~30%) | -2.55 (34.45) | -0.64 (2.03) | -2.78 (15.72) | 0.00 (0.17) | -1.69 (12.35) | -1.75 (5.65) |

次に管種別に、下限5%に相当する管きよ延長、平均の管きよ延長、上限5%に相当する管きよ延長を求めた。これらの管きよ延長に対するハザード率 θ を求め、 θ の逆数である期待期間長を算出した。コンクリート系（合流・汚水）の結果を図-4に示す。上述のとおり管きよ延長が長いほどハザード率 θ が小さくなるため、上限5%に相当する管きよ延長の期待寿命が最も大きくなっ

ている。また推定されたハザード率 θ を用いて、点検間隔 $Z=1$ とした場合のコンクリート系（合流・汚水）のマルコフ推移確率 π_{ij} について、表-5に示す。さらに、その推移確率に基づいて推定された劣化の状態分布の推移予測を図-5に示す。これより、要改築の基準である健全度5（不良率30%以上）に目標耐用年数89年付近で達するスパンの割合は約5割程度と見込まれる。

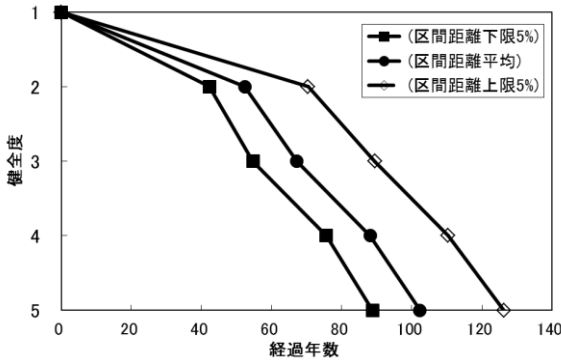


図-4 期待期間長に基づく劣化予測

表-5 マルコフ推移確率

| | | 推移後の健全度 | | | | |
|---------|---|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 推移元の健全度 | 1 | 0.9811 | 0.0183 | 0.0006 | 0.0000 | 0.0000 |
| | 2 | 0.0000 | 0.9348 | 0.0635 | 0.0017 | 0.0000 |
| | 3 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9492 | 0.0491 | 0.0018 |
| | 4 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9320 | 0.0680 |
| | 5 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 |

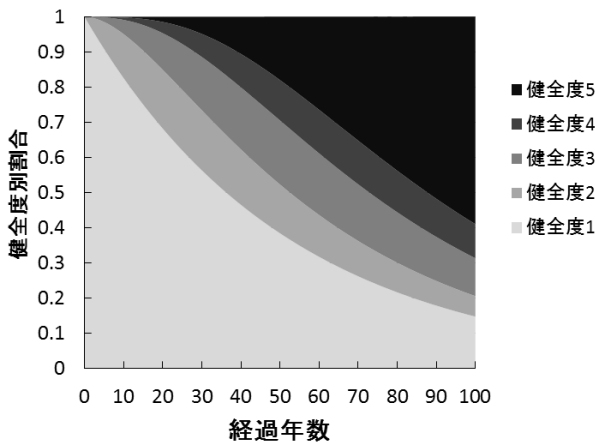


図-5 状態分布推移図

(4) 目標耐用年数の設定

3.(3)で示した結果から、現行の目標耐用年数との差分等を考慮の上、目標耐用年数の見直しを行った。表-1に示した現行の目標耐用年数と3.(3)で求めた期待寿命との比較を表-6に示す。いずれの場合も現行より目標耐用年数が大きくなり、最も管きよ延長が短い下限5%値の場合に、現行との差分が最小となった。よって、より安全側の目標耐用年数として、下限5%値を採用するこ

ととした。よって単回帰分析による劣化予測式からマルコフ劣化ハザードモデルによる劣化予測式に見直すことで、目標耐用年数を17~29年延長できることが示された。

表-6 期待寿命と現行目標耐用年数との比較

| 管種 | 区分 | 管きよ延長 (m) | 期待寿命 (年) | 現行との差分 (年) |
|-------------------|-------|-----------|----------|-----------------|
| コンクリート系管 合流・汚水 | 下限5%値 | 8.8 | 89 | 17~24 |
| | 平均値 | 34.8 | 102 | 30~37 |
| | 上限5%値 | 70.8 | 126 | 54~61 |
| コンクリート系管 雨水 | 下限5%値 | 13.2 | 101 | 26~29 |
| | 平均値 | 38.6 | 126 | 51~54 |
| | 上限5%値 | 74.9 | 178 | 103~106 |
| 陶管 | 下限5%値 | 5.7 | 58 | 24 [*] |
| | 平均値 | 32.1 | 70 | 36 [*] |
| | 上限5%値 | 58.5 | 91 | 57 [*] |

※陶管については昭和60年時点(34年経過)との差分

4. 考察

本市では劣化予測に基づき、目標耐用年数に到達する1~10年前にTVカメラ調査を実施している。上述のとおり、現行ではTVカメラ調査で不良率30%を上回るスパンは、調査したスパンのうち2割程度であった。今回の劣化予測見直しで、この割合がどの程度向上するかということが、一つの評価指標となる。図-5に示した分布図のとおり5割程度発見できれば、現行の2倍近い効率で発見できることとなり、管きよ調査の費用対効果がより高まったと言える。

一方で、今回推定したマルコフ劣化ハザードモデルは平均的な管きよの劣化推移を予測しているものであり、中長期の改築事業量の算定等に適したモデルである。そのため、個別のスパンの劣化予測に適用した際には実際の劣化推移と乖離するスパンもあると考えられる。例えばTVカメラ調査結果からは、地区単位で不良率が高い地域や、ある特定の工事で布設された管きよで不良率が高い場合などが見受けられた。これらは施工や材料などの他、地盤条件や地震等の外力の受けやすさなど様々な原因が考えられる。既往の研究では、特定の期間に布設された管きよの劣化が早いことから、期間別に劣化予測を行った事例もあり⁹⁾、今後劣化予測を運用していく上では、こういった地域特性とも言える要素を経験的に集約していく必要があると考えられる。

加えて、同一年度に布設された管きよであっても、経年とともに健全でない管きよは改築され、健全な管きよは残存していく。残存している管きよのみで劣化を評価すると、改築済みの管きよに生じていた劣化が考慮されないため、劣化を過小に評価してしまう可能性が指摘されており、国総研の下水道研究室が公表している劣化予測式では補正を行っている⁹⁾。今回の劣化予測の見直しではそのような補正は行っておらず、劣化を過小に評価

している可能性がある。また目標耐用年数も延伸されるため、現行の基準では早い段階で改築されていた管きよも今後は残存しやすくなると考えられる。よって同一の経過年数の管きよであっても、現行の基準で調査された管きよよりも、見直し後に調査された管きよの方がより劣化の進行した状態のものが増えると考えられ、このような点に留意して見直し後の劣化予測を運用していく必要がある。

また今回のモデル作成にあたっては、本市の TV カメラ調査結果を用いたが、サンプル数やサンプルの偏りなどにより、サンプルのグルーピングや解析手法などで制約が生じた。また本市下水道台帳のデータベースにおいて属性項目として設定されてはいるものの、多くの管きよでデータが未登録であり、解析する上では使用できない項目となってしまうものが見られた。今後は TV カメラ調査によってサンプルの量的・質的な向上を図るとともに、管きよの基本情報となる下水道台帳の精度向上を併せて進め、将来的な劣化予測の見直しなど、より効率的・効果的な維持管理につなげていく必要があると考える。

5. おわりに

これまで述べてきたように、本稿では本市下水道事業

AMS のリスク管理の取組みにおける改善状況について報告した。これらの内容は、令和 3 年度から始まる次期経営計画に反映する予定である。AMS は継続的改善の仕組みであることから、リスク管理に限らず目標／指標管理や業務プロセス管理といったその他の AMS 構成要素についても不断の改善を図り、今後も引き続き事業運営の一層の効率化・合理化に努めていきたい。

参考文献

- 1) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 土木学会論文集, pp.69-82, 2005
- 2) 貝戸清之, 鎌田敏郎, 大谷明, 山中明彦, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1429-1434, 2010
- 3) 竹石和夫, 辻諭, 藤木修, 第 1 回 JAAM 研究発表会, マルコフモデルを用いた下水管路の劣化解析, 2017
- 4) JSWAS A-1, R-2
- 5) 田中伸幸, 貝戸清之, 鎌田敏郎, 山中明彦, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1333-1338, 2014
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究室, 健全率予測式の作成方法 http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/explanatory_document.pdf (閲覧日 2019/10/8)