

下水道管きよの長寿命化に向けた具体的解析手法〈第2回〉

一般社団法人 管路診断コンサルタント協会 技術委員 中 根 進

③ 具体的な手法

3.1 ワイブル分布を用いた施設状態

図-3（〈第1回〉に掲載）の経過年数に対する施設状態を示す直線や曲線を具体的にワイブル分布を使って示す。平成21年度の管診協技術講習会では、「管きよの寿命はどのくらいか」という質問を受けることがあった。国土交通省が平成17年当時、自治体にアンケート調査を行って得られた改築延長のデータとワイブル分布を使った解析事例⁴⁾を用い、改築までに要する年数（寿命）を推定する方法を説明する。

ワイブル分布では管きよの信頼度（累積残存率）を式-1の3式⁵⁾で表す。またワイブル分布の確率密度関数 f_w の平均 μ を(4)式、分散 σ^2 は(5)式

で表す（式-2）。

形状パラメータ m （一定）、尺度パラメータ η の変化に対する(1)式の信頼度 R_w と(2)式の確率密度 f_w は図-6のように変化する。

(3)式の故障率 λ_w は、形状パラメータ m により図-7のように変化する。機械設備では、「この機器は、年々故障が増えている」、「この機器はほと

式-2 確率密度関数の平均と分散

$$\text{平均 } \mu : \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{分散 } \sigma^2 : \eta^2 \cdot \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right) \right\} \dots\dots\dots (5)$$

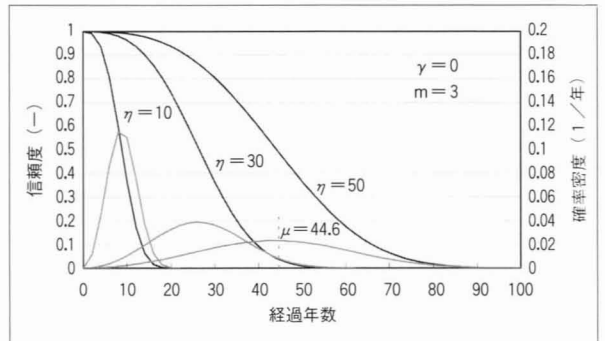
ただし、 $\Gamma()$ はガンマ関数を示す。

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$$

式-1 ワイブル分布で表す管きよの信頼度

- 信頼度関数 $R_w(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \dots\dots\dots (1)$
- 確率密度関数 $f_w(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \dots\dots\dots (2)$
- 故障率（ハザード関数） $\lambda_w(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \dots\dots\dots (3)$

図-6 信頼度と確率密度



んど故障しない」と表現することがある。これを表すのが図-7の故障率 $\lambda_w(t)$ であり、故障率の曲線はバスタブ曲線としても知られている。

形状パラメータ m の大きさで、故障発生型の型を次のように分類している。

$m < 1$ 故障率減少型 → 初期故障型

[事後保全]

製造・設計上の不具合が各製品に内在しているため、稼働初期に故障率が高く、経時的に次第に故障率が減少する型である。

予防的な保全を行っても信頼性を向上させる効果がなく故障が生じてからの事後保全になる。

$m = 1$ 故障率一定型 → 偶発故障型

[予防保全 (時間計画保全)]

何らかの要因で偶発的な故障原因が発生して、機器などが使用不可となる型である。

図-7 故障率

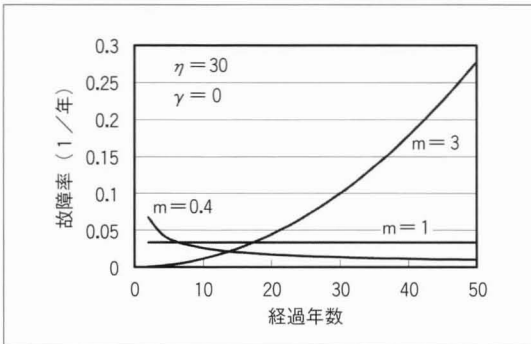
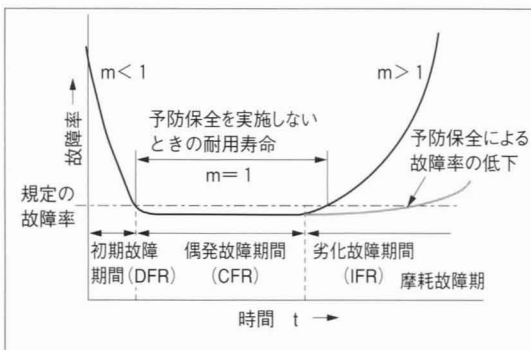


図-8 故障率 (バスタブ曲線)



$m > 1$ 故障率増大型 → 摩耗故障型

[予防保全 (状態監視保全)]

稼働の始まりには故障の出方が少なく、時間の経過にしたがって故障率が漸増する型である。予防的な保全が効果的な機器である。

ここで、[] 内は、効果的な保全方法を前掲表-1 (<第1回>に掲載)の管理方法の例を参考に m 値によって分類した。

『設備管理技術事典』⁶⁾ p.32では、故障率を示すバスタブ曲線を図-8で示している。

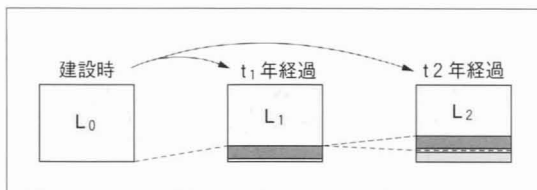
信頼度 (累積残存率) が前掲図-3のように直線に仮定すると、 $\eta = 0$ 、形状パラメータ m は1.52であり、故障率 λ_w は年々増加していく型ではあるが、上に凸な曲線となり、一定経過時間 (年) 以上となると、故障率が一定してくる。

故障率が一定ということは、管理の分類としては、予防保全というよりも事後保全となる。 $m > 2$ になると、下に凸な曲線となり故障が年々増加する型となることから、予防保全的な管理を進めることにより、図-8 (右側) のように故障率を減少させる。予防保全的な管理は m を小さくすることであり、筆者の解析⁷⁾では、処理場の機器は $m \approx 1$ であり、予防保全的な管理がなされている証拠と考えられる。機器を構成する部品、例えば掻寄機のスプロケットは、 $m > 2.1$ で摩耗故障型を示しており、機器は部品の取替えや補修で $m \approx 1$

式-3 ワイブル分布における管きよの施設状態

$$\text{改築割合 } \lambda = \frac{\text{改築延長 } L_d}{\text{供用延長}} = \frac{\text{改築延長 } L_d}{\text{残存延長 } L + \text{改築延長 } L_d}$$

図-9 管きよの残存延長



を保持していると考えることができる。

次に、下水道管きよはどのような信頼度曲線や故障率を示すか、事例を用いて紹介する。

3.1.1 管きよの施設状態と寿命

ここからは、管きよの施設状態を式-3の改築割合からワイブル分布を使って説明する。

各年度の改築延長実績から図-9を参考に、残存延長を式-4で算定し、管きよの改築に関する信頼度を算出する。

式-4 管きよの改築に関する信頼度

$$\begin{aligned}
 &L_0 \\
 &L_1 = L_0 (1 - \lambda_1) \\
 &L_2 = L_1 (1 - \lambda_2) \\
 &\dots \\
 &L_t = L_{t-1} (1 - \lambda_t) \\
 \text{t年後の残存延長} \\
 &L_t = L_0 (1 - \lambda_1) (1 - \lambda_2) \dots (1 - \lambda_t) \\
 \text{t年後の信頼度} \\
 &L_t / L_0 = (1 - \lambda_1) (1 - \lambda_2) \dots (1 - \lambda_t) \\
 &= R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_t \\
 &R_w(t) = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_t \dots (6)
 \end{aligned}$$

この信頼度を図示すると図-10となる。この本文中の信頼度は、改築せずに残存している管きよ延長の割合を意味する。

建設年度毎の改築延長と改築せず残っている残存延長を調査し、信頼度（累積残存率）を算出する。調査年度（次式の例では2005年度）で得られた改築割合が、過年度の改築も同値と仮定する。Rの下添え字は、管きよの建設年次を表す（式-5）。

10年経過後の信頼度Rwは、(7)式で表せる。

$$R_w(10) = R_{05(1)} \cdot R_{05(2)} \cdot \dots \cdot R_{05(9)} \cdot R_{05(10)} \dots (7)$$

(7)式のRの下添え字は、各年度施工の管きよの調査年次を表し、()内は経過年数を示す。

国土省のアンケート調査結果（平成17年度の残存延長と改築延長）から経過年数毎に信頼度を算出して図-11に実績値として●印で示す。

図-10 管きよの信頼度（累積残存率）

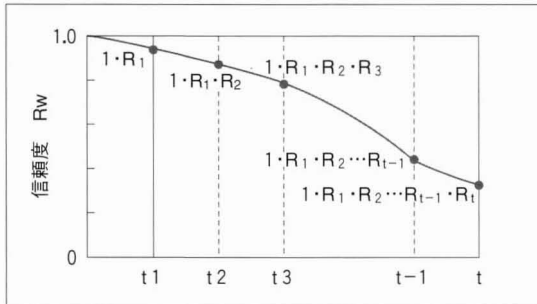
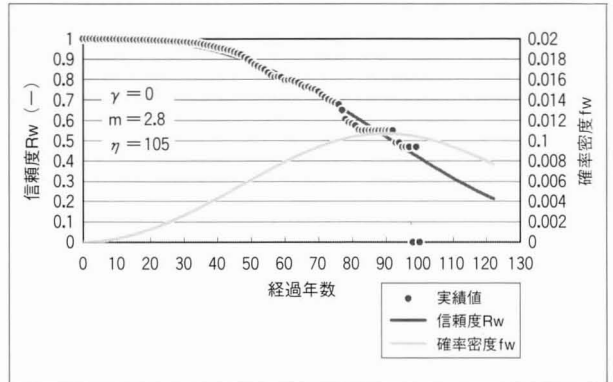


図-11 信頼度曲線と確率密度曲線



式-5 建設年度毎の信頼度（累積残存率）

96年度施工分の管きよ	$R_{96(1)} = R_{97(1)} = R_{98(1)} = \dots = R_{04(1)} = R_{05(1)}$	調査年度 既知
97年度施工分の管きよ	$R_{97(2)} = R_{98(2)} = \dots = R_{04(2)} = R_{05(2)}$	
98年度施工分の管きよ	$R_{98(3)} = \dots$	
04年度施工分の管きよ	$R_{04(t-2)} = R_{05(t-1)} = R_{05(t)}$	

この実績値に対し(1)式の係数 m 、 η を最小二乗法で決定し、あわせて図-11に実線で示す。この曲線を信頼度曲線(改築曲線)とする。

図-11に示す確率密度曲線 f_w で囲まれる面積は1であり、その面積が0.5となる位置は経過年数が92年程度のところである。この確率密度曲線から、わが国では既設管きよ延長の半分を改築するのに92年程度かかっていることが明らかになる。

改築延長が、劣化の進んだ管きよをすべて改築した結果を表しているとすれば、確率密度の定義から、残存管きよ延長と改築延長の割合が半々となる経過年数92年程度が管きよの寿命ということができる。

解析で得た係数 m 、 η を使って(3)式で故障率(改築率) λ_w を算出し、図-12に示す。図-12に示す故障率曲線から管きよの特徴は、 $m=2.8 > 1$ となり、「故障率増大型→摩耗故障型」を表し、建設当初には故障の出方が少なく、時間の経過に

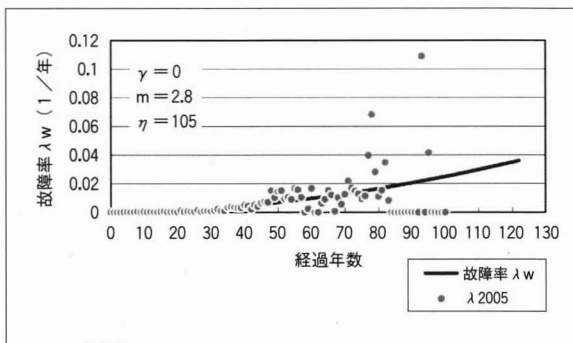
したがって故障率が漸増する型である。このことから、管きよは予防的な保全が効果的な施設ということが出来る。

ワイブル分布の信頼度曲線(改築曲線)を利用し、過年度の整備延長が台帳等で図-13(左側)のように明確になっていれば、図-13(右側)に示す将来の改築量が推定できる。

また、改築に要する1m当たり工事費を想定することにより、将来の改築に要する事業費が算出でき、新設整備分の事業費とともに、毎年度の事業費規模が推定できる。予算規模により、これらの事業費(新規+改築)の平準化が必要かどうかの判断も可能となる。3.2.3に後述するが、事業費の平準化にあたっては、単に改築すべき管きよ工事を先送りするのではなく、予防保全を行うことにより、改築費を少なくする必要も生じてくる。

3.1.3に示すワイブル分布では、予防保全の効果を紹介するのは難しいことから、次にマルコフ連鎖を使って管路施設の劣化曲線(劣化度割合曲線)を推定し、この劣化曲線から予防保全の効果を示す。

図-12 故障率曲線

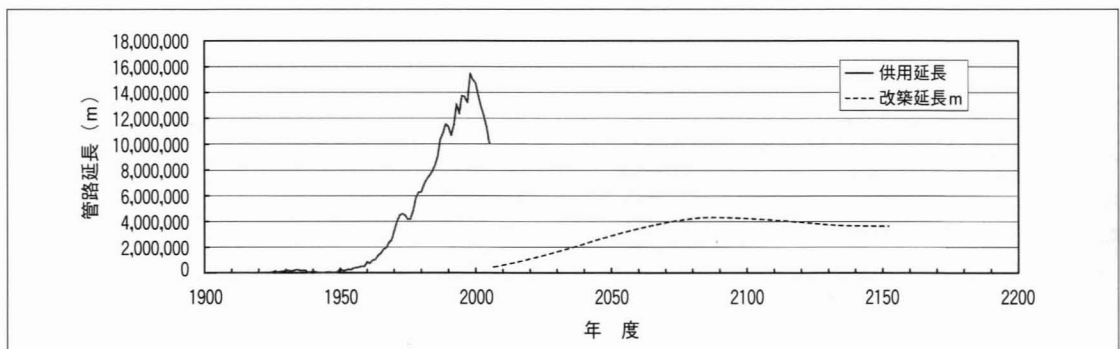


3.2 マルコフ連鎖を用いた施設状態

管路施設の施設状態は、TVカメラ調査や目視調査の結果から『手引き』³⁾の評価基準例を参考にスパン単位で診断し、管きよの不良発生率を用いて劣化状態として表現する。

マルコフ連鎖⁸⁾は、その劣化状態(劣化度 $D \cdot C \cdot B \cdot A$)を図-14のように各劣化レベルに推

図-13 全国改築延長の推計

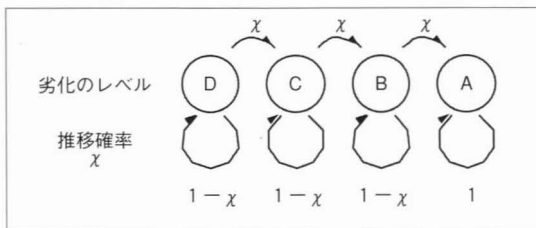


移する割合（推移確率 χ ）を使って表現する手法である。

これは、単位時間Tを経過すると、ある推移確率 χ で管きよの劣化段階（劣化度D・C・B・A）が1レベル進行し、残りの管きよは確率 $1-\chi$ で同じ劣化レベルに留まるというものである（式-6参照）。

経過年数毎に点検調査区域の管きよ劣化状態（劣化度割合）を調査しておき、推移確率 χ を仮定し、各経過年数の劣化度割合を計算し、調査で得られた劣化度割合と良く一致するまで推移確率 χ を変化させる。具体的には最小二乗法を用いて χ を求める。このようにして求めた推移確率 χ から計算した劣化曲線（劣化度割合）の一例を図-15

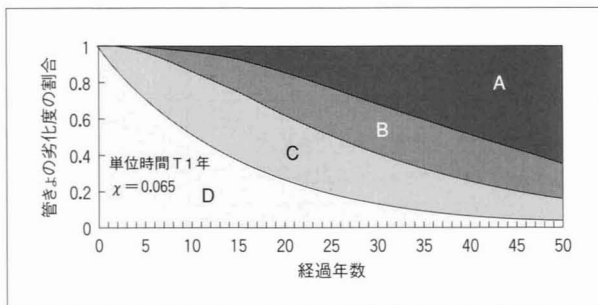
図-14 マルコフ連鎖による劣化



式-6 マルコフ連鎖による劣化式

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} D & C & B & A \end{matrix} \\ \begin{matrix} D \\ C \\ B \\ A \end{matrix} & = \begin{bmatrix} 1-\chi & 0 & 0 & 0 \\ \chi & 1-\chi & 0 & 0 \\ 0 & \chi & 1-\chi & 0 \\ 0 & 0 & \chi & 1 \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{matrix} \quad \dots\dots (8)$$

図-15 管きよの劣化曲線⁸⁾



(管きよ)、図-16（組立人孔）、図-17（マンホール蓋）に示す。なお、組立人孔、マンホール蓋については、『手引き』³⁾などでは評価基準例が示されていないので、これらを参考に設定したものである。

図-15、16、17は、公共下水道ではなく、住宅団地の汚水管きよの事例⁴⁾である。

事例の劣化度Aについては、TVカメラ調査、目視調査の結果、すみやかに取り替えると診断したものであり、改築（更新、長寿命化）を望む施設である。

図-16 組立人孔の劣化曲線⁹⁾

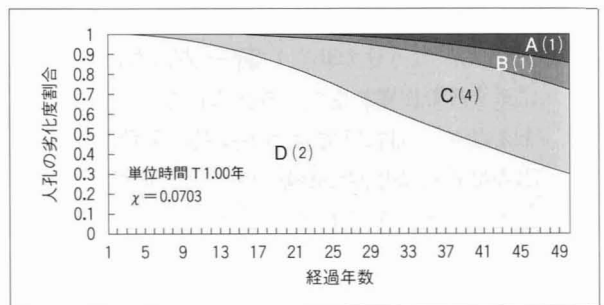


図-17 マンホール蓋の劣化曲線⁹⁾

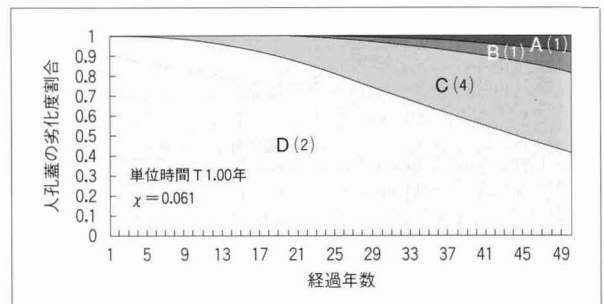
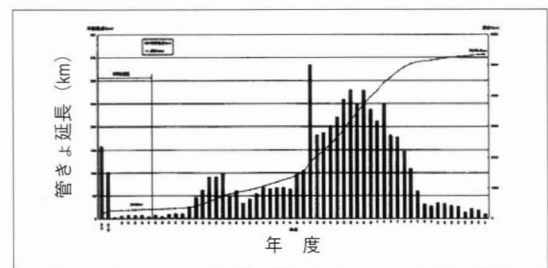


図-18 K市管きよ布設実績



3.2.1 公共下水道の管きょ施設状態

このマルコフ手法を使ってあらかじめ推移確率 χ を推定しておくことにより、自治体全体の管きょ劣化状態も推定することができる。一例としてK市の管きょ劣化状態を示す。

K市の管きょ布設状況¹⁰⁾ (図-18) より年度別の管きょ延長を読み取り解析データとし、実績の合流管きょの劣化曲線¹¹⁾ (図-19) を使って経過年数別、各劣化度別延長を算定し、経過年数ごとに集計したものが図-20となる。

この一連の図には、政令都市をはじめとする大都市が含まれており、適切な維持管理が行われていると推察されるが、それでも図-20のように劣化が進んでいくことを示している。この劣化度Aの状態が、そのままの状態に留まって推移すればよいが、放置することにより管破損による道路陥没事故などのリスクが生じる。

3.2.2 予防保全(修繕)を考慮した改築量の推定

そこで、予防保全の効果を数値的に明らかにするため、劣化レベルBと診断した管きょを例に、

劣化レベルBと判定したスパンの劣化部分一本単位あるいは浸入水などの劣化対象の項目を修繕(予防保全)するものとし、管きょの修繕後について再診断する。修繕することにより劣化レベルBに留まるスパンや劣化レベルCに下がるものがあり、レベルAに上がるものが少なくなり、予防保全(修繕)効果が表れる。

修繕によって劣化レベルBからレベルCになる割合を、再診断の結果から式(9)を使って算定する。

$$Fr = \text{レベルCにする、またはレベルCになる延長等} / \text{レベルB延長等} \dots\dots\dots (9)$$

修繕割合を含めたマルコフ連鎖の概念¹²⁾ を図-21に示す。Frを実際の再診断結果ではなく、ここでは $Fr=0$ (シナリオ1:修繕なし)、 $Fr=0.1$ (シナリオ2)、 $Fr=0.2$ (シナリオ3) と仮定し、マルコフ連鎖で再計算すると予防保全を考慮した改築量が推定できる。

その結果を図-22~24に示す。修繕量を増すことにより改築量を減らすことが明らかになる。

改築、修繕に要する費用を1m当たりあるいはスパン当たりで想定することにより、図-25に示す事業費(改築+修繕)を概算することが可能となる。

3.2.3 長寿命化対策のイメージ

「長寿命化対策」とは、予防保全的な管理および更生工

図-19 合流管きょの劣化曲線

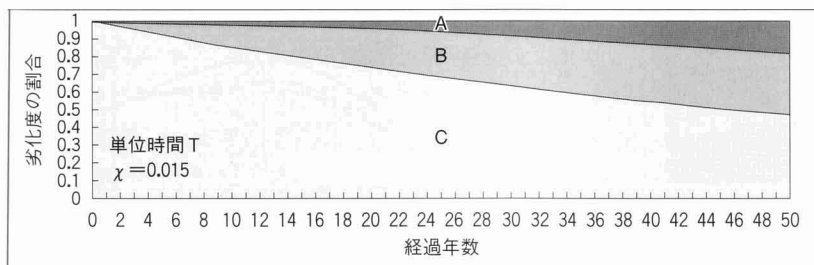


図-20 管きょの劣化状態の推移 (K市)

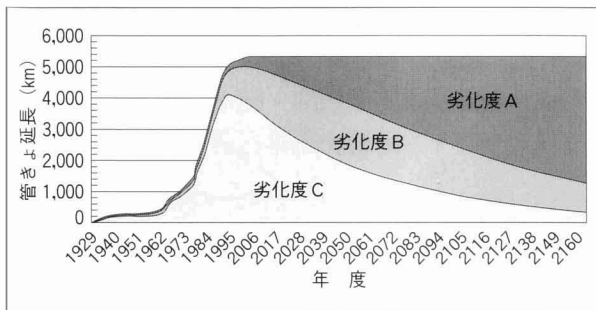
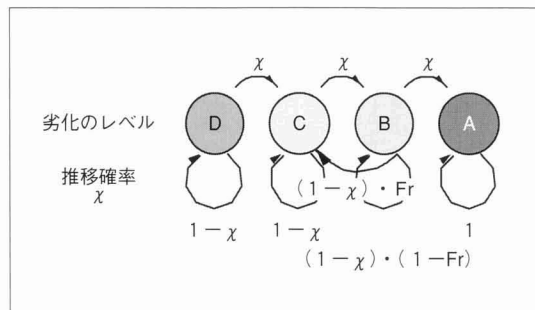


図-21 マルコフ連鎖による改築・修繕の概念



法あるいは部分取替え等により既存ストックを活用し、耐用年数の延伸に寄与する行為としている。前掲図-2（＜第1回＞に掲載）の長寿命化対策のイメージをマルコフ連鎖で表現する。

図-26に示す単一年度で建設した対象区域、路線に対して過去の修繕やTVカメラ調査結果などから前掲図-15の劣化曲線（信頼度曲線）が得られたとして説明する。

劣化度AとBの境界線を抽出して図-27の実線（灰色）とする。ある管理基準（この場合は0.7）

図-22 シナリオ1（事後保全型）

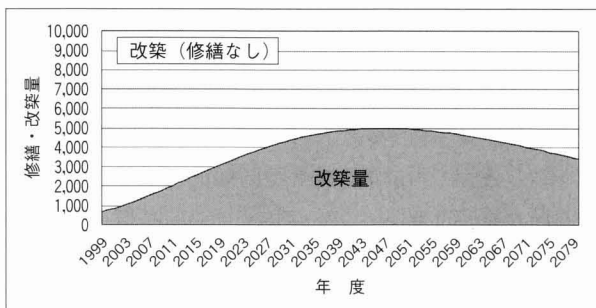


図-23 シナリオ2（予防保全型）

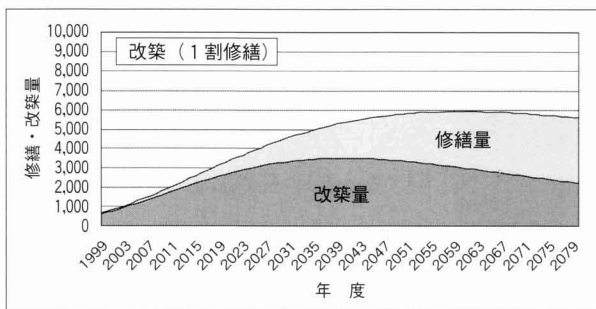
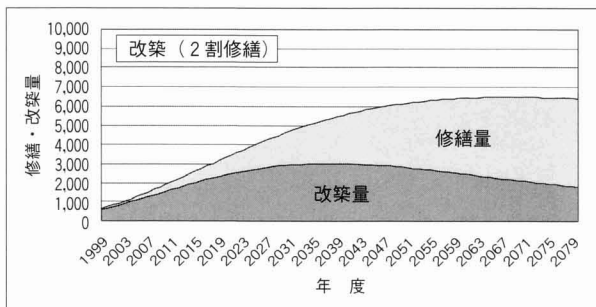


図-24 シナリオ3（予防保全型）



を設定し、劣化度Aの管きょ（経過年数30年）を単年度で取り替える場合を示すと図-27のノコギリ刃状となる。

取り替え後、対象路線管きょは、標準耐用年数50年で管理基準0.7に達していないので、延命化である。

また管理基準を0.65とし、32年経過した劣化度Aを取り替えると図-28となり、この取替えにより標準耐用年数50年を超えていることから、長寿命化が果たされたということが出来る。

また図-28では、管理基準に達した管きょを全量取り替えていることから、表-1（＜第1回＞に掲載）の予防保全型の改築ということもできる。

管理基準線は、予算規模と設定した基準線での管理によって、陥没事故などが発生しなかったという実績の積み重ねが必要である。

なお、マルコフ連鎖の計算は、管きょの取替えを行った場合には、その管きょは新品になったものとして劣化度Dに上げて再計算を行い、劣化曲線を描く。

図-25 中長期事業費（改築+修繕）

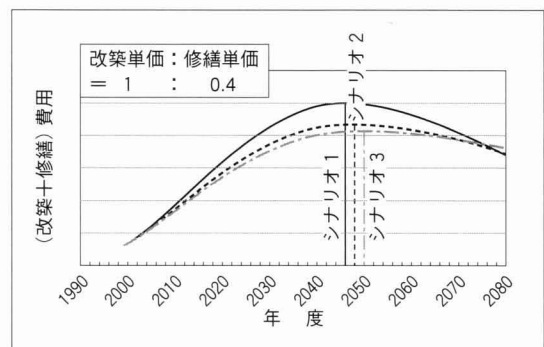
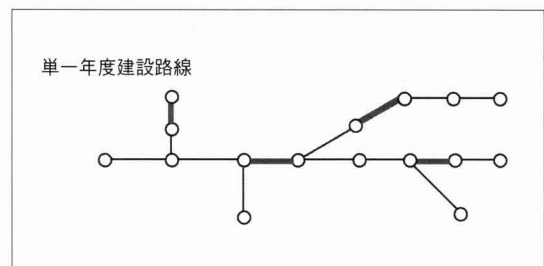
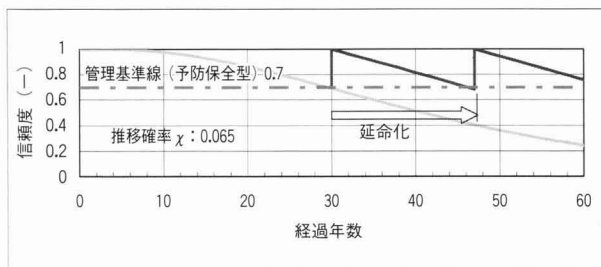


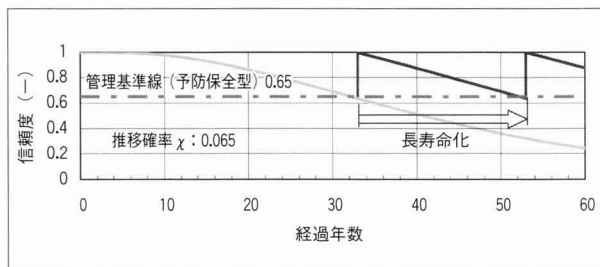
図-26 対象路線と長寿命化対策スパン



図一27 信頼度曲線と延命化



図一28 信頼度曲線と長寿命化



ここで、「管きよの取替え」と表現したのは、「管きよの更新」あるいは「管きよの長寿命化」と表現すると長寿命化支援制度の定義（耐用年数、処分制限期間）に抵触することを避けるためである。

スパンごとの取替えの結果、対象路線の信頼度（劣化度割合）が建設当初の管の耐用年数50年を超えれば、このスパンの取替えは長寿命化ということが出来る。長寿命化の要件である処分制限期間20年は、補助金を投入したスパン単位の工事を対象とする信頼度曲線になじまない。

このような信頼度を使った考え方は、『手引き（平成21年度版）』¹³⁾ p.24管きよの（コスト改善額の算定例）の追加によって、馴染まないこととなった。すなわち、取り替えたスパンの管きよが基準年数（耐用年数、処分制限期間）を超え、LCC（ライフサイクルコスト）の改善が認められなければならないとされている。また、取替えスパンの期待される使用年数の設定は、各自治体において検討し、説明根拠を明確にしておく必要があるとされた。

しかし、信頼度を使った手法は、長寿命化支援

制度に直接利用できないにしても、修繕・改築量を考慮した中長期計画に利用できると考える。

<参 考 文 献>

- 4) 全国事業量等に関するアセットマネジメント導入検討調査、国土技術政策総合研究所 藤生和也、松宮洋介、宮内千里、平成18年度下水道関係調査研究年次報告書集
- 5) 改訂版 信頼性工学入門、真壁肇編、日本規格協会
- 6) 設備管理技術事典、(株)産業技術サービスセンター
- 7) 下水処理場プラント機器の信頼性解析事例、中日本建設コンサルタント(株)中根進、下水道協会誌論文集、2006年4月
- 8) テレビカメラ調査診断結果による下水道管きよの劣化予測、中日本建設コンサルタント(株)中根進、下水道協会誌論文集、2007年9月
- 9) 目視調査診断による組立人孔の劣化予測、中日本建設コンサルタント(株)内山恭志、中根進、第45回下水道研究発表会Ⅱ-5-2-2、2008年7月
- 10) 日本下水道新聞、2007年3月6日
- 11) 下水道管渠の診断結果から見た劣化発見率と劣化原因率、国土技術政策総合研究所 宮内千里、(独)土木研究所 酒井憲司、第43回下水道研究発表会講演集、2006年7月
- 12) マルコフ連鎖を用いた管きよ修繕・改築量の推計、中日本建設コンサルタント(株)田巻拓郎、中根進、第46回下水道研究発表会Ⅱ-5-1-2、2009年7月
- 13) 下水道長寿命化支援制度に関する手引き（案）平成21年度版、国土交通省都市・地域整備局下水道部、2009年6月



水コン協：
**本部・関東支部事務所を
 西日暮里へ移転**

(社)全国上下水道コンサルタント協会は9月20日、事務所を移転し、下記所在地にて業務を開始した。

今回の事務所移転は、上下水道事業を取り巻く社会・経済環境が厳しさを増していることから一層の経

費節減を図っていこうとの目的によるもの。新事務所は、JR山手線・京浜東北線「西日暮里」駅より徒歩3分、営団地下鉄千代田線「西日暮里」駅3番出口より徒歩2分。

〒116-0013
 東京都荒川区西日暮里5-26-8
 スズヨシビル7階
 Tel.03-6806-5751、Fax.03-6806-5753