

# 健全率予測式の作成方法

## 1. 健全率予測式の概要

（「ストックマネジメント手法を踏まえた下水道長寿命化恒策定に関する手引き」の参考資料より引用編集）

管路施設のストック量は膨大である。そのため、全ての施設を平等に点検・調査することは、労力的にも、時間的にも、費用的にも困難である。そのため、限られた条件のもとで、効率よくかつ効果的に施設のストックマネジメントを実践するために、リスク評価による優先順位付けを行いつつ、制約条件（予算、組織体制等）を勘案し、適切な対策手法を組み合わせることで全体最適化を図り、点検・調査計画及び改築・修繕計画を策定・実行することが合理的である。

リスクは、「その事象が顕在化すると、好ましくない影響が発生する」と「その事象がいつ顕在化するかが明らかではない」という性質を持っている（JIS Q 31000 リスクマネジメント原則及び指針より）。従って、どのような事象が、どのような被害（影響）を与えるか、その可能性はどれくらいかを評価し、コントロール（点検・調査及び改築・修繕の優先度等への活用）する必要がある、一般にリスクの大きさは、「好ましくない事象の被害規模」と「好ましくない事象の発生確率」の積として表される。

管路管理においては、不具合の発生確率（不具合の起こりやすさ）は、管路施設の劣化及び事故等の発生の実態に基づいて検討するのが一般的である。

管路施設の不具合の起こりやすさは、管路施設の状態（健全性）が悪くなるにつれて高くなると想定されることや、一般に理解しやすい概念であることなどを考慮して、「健全度」を代用指標として用いることが考えられる。

また、管路施設に関する健全度評価が実施されていない地方公共団体については、管路施設の劣化による不具合の発生確率が、初期不良と予期せぬ出来事の発生を除けば、経過年数に応じて発生確率が高くなる傾向にあることを考慮して、「経過年数」を代用指標として使用することが多い。

健全率とは、全管きょに対する健全な（ある緊急度ランク以上の）管きょの割合を示し、その健全率と経過年数の関係式を「健全率予測式」という。健全率予測式は、管路施設全体の（マクロ的な）劣化状態の進行状況を表しており、この予測式により、ある経過年数後に、同じ属性を有する管路施設の何割が改築を必要とするかを把握することができる。

### （健全度とは）

健全度とは、管路施設の状態を段階別に区分して、管路施設の健全性をランク分けしたものである。

### （健全率予測式とは）

健全率とは、全管きょに対する健全な（ある緊急度ランク以上の）管きょの割合を示し、その健全率と経過年数の関係式を「健全率予測式」という。健全率予測式は、管路施設全体の（マクロ的な）劣化状態の進行状況を表している。

## 2. 健全率予測式の作成方法

将来、発生する改築事業量の予測に当たっては、過年度に実施した管きょ調査のデータと改築の実績データを活用するものとする。長期の改築事業量予測に当たっては、標準耐用年数である50年を基本に検討される場合もあるが、これは管きょの劣化進行の実態を反映したものでなく、わかりやすいが説得力に欠ける。

ここで紹介する健全率曲線およびその近似式である健全率予測式は、全体資産数に対する健全資産数の割合の推移を示すものである。個々の管あるいはスパンの健全度の時間的变化を示す「健全度曲線」ではない。

### 2-1 見かけの健全率

まず、管きょ調査結果を整理する。整理する項目は①管種、②経過年数、③スパンの判定結果である。但し、1. と2. では、手法が理解しやすいように、管種別に分けないケースを紹介する。管種別の解析は4. で言及する。

次に経過年数であるが、これは健全率曲線の横軸（X軸）として必須である。布設年度と管きょの調査年度の差が経過年数であり、管齢と呼ばれる場合もある。

最後にスパンの判定結果であるが、これを得るための管きょの調査診断方法は、下水道協会発行の維持管理指針<sup>1)</sup> や手引き<sup>2)</sup> に手法が示されているものの、各自治体で独自の判定方法が採用されている場合もある。特に政令市など歴史の古い団体はその傾向が強いが、これは、おそらく協会で統一的な指針が示される前から独自の基準を設けて実施していたために、そうなっていると思料する。協会の指針ではスパンごとに緊急度Ⅰ（重度）、緊急度Ⅱ（中度）、緊急度Ⅲ（軽度）、劣化なしの4段階に判定されることになる（表-1）。

表-1 緊急度の対応の基準

	区分	対応の基準
緊急度Ⅰ	重度	速やかに措置することが必要
緊急度Ⅱ	中度	簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる
緊急度Ⅲ	軽度	簡易な対応により必要な措置を5年以上まで延長できる

国総研の提案する健全率曲線の縦軸（Y軸）には、協会指針によるスパンの緊急度判定方法に基づき健全なスパン数の割合を用いる。また、緊急度Ⅰと緊急度Ⅱを改築対象となる劣化ありの状態と定義し、緊急度Ⅲと劣化なしを改築が必要とならない状態、つまり健全な状態と定義した。これはいくつかの自治体からのヒアリングによると緊急度Ⅰと緊急度Ⅱの状態を改築対象としている例が多かったからである。緊急度Ⅲを健全とすることに違和感を覚える方がおられると思うが、今求めようとしている健全率曲線は改築事業量を予測するために描く健全率曲線であり、文字通りの健全率ではないことと理解頂きたい。以上、まとめると、経過年数毎の改築が必要とならない緊急度Ⅲと劣化なしのスパン数の割合を健全率と呼び、この割合を管きょ調査の結果のみから求めたものを見かけの健全率と

呼んでいる。

見かけの健全率の定義を式で示すと以下の通りである。

$$\text{見かけの健全率} = 1 - (\text{緊急度 I 又は II のスパン数}) / (\text{経過年数毎の調査スパン総数})$$

ここで、簡単な例を示す。表-2のように、経過年数 30 年、50 年、70 年（30 才、50 才、70 才）のスパンを 30 箇所、50 箇所、40 箇所調査を実施したとする。

表-2 見かけの健全率の計算例

経過年数 (才)	調査スパン数 (箇所)	緊急度 I 又は II (箇所)	緊急度 III 以下 (箇所)	見かけの健全率 (%)
30	30	6	24	80
50	50	15	35	70
70	40	24	16	40

このとき、調査結果において緊急度 I または緊急度 II となったスパン数が 6 箇所、15 箇所、24 箇所であったとしよう。緊急度 III 以下つまり緊急度 III または劣化なしのスパン数は、それぞれ、24 箇所 (=30-6)、35 箇所 (=50-15)、16 箇所 (=40-24) となる。縦軸となる見かけの健全率は、それぞれ、80% (=24/30)、70% (=35/50)、40% (=16/40) となる。30 才、50 才、70 才のスパンの見かけの健全率 80%、70%、40% をプロットし、適当な近似式を引いた場合、これを見かけの健全率曲線と呼んでいる (図-1)。

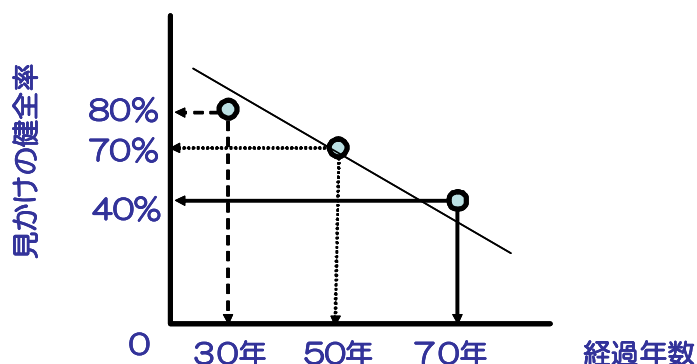
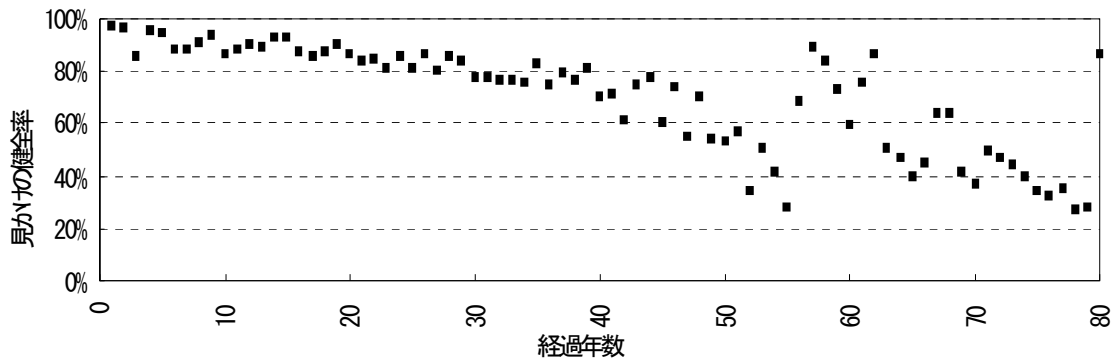


図-1 見かけの健全率曲線の例

実際のデータを用いた結果を図-2に示す。ここで用いた実際のデータとは政令市等大都市 8 団体と一般市 4 団体が、1988 年～2006 年までに実施した調査結果である。スパン数にして約 17 万に上る膨大な調査の結果である。尚、図中の見かけの健全率は管種別（陶管、コンクリート管、塩ビ管）に計算した後、算術平均をとったものである。



図－２ 実データによる見かけの健全率

さて、ここでそもそもなぜ「見かけの」と称しているのかに言及する。著者らが図－２を初めて描いた時の感想は、意外と高齢の管、つまり経過年数が相当経た管の健全率が高いということである。これはなぜか？そもそも高齢の管きよの調査には、その年齢に達するまでに改築されてしまった管、つまりより若いときに改築された管が調査の母数に含まれていないということに気付いた。改築されたスパンはその時点で 0 才として生まれ変わったとして台帳上処理され、老朽管としての調査対象にならない。つまり、管きよ調査結果を経過年数と緊急度判定結果の割合で並べただけでは、改築されなかった管きよだけに着目しているので、劣化進行を正しくとらえられないとの考えに至った。

## 2-2 管きよ生存率

ではどのようにある経過年数までに改築された管きよの割合を見積もるかという課題が生じる。このような生存、死亡に関する統計計算は人間の平均余命を予測する手法<sup>3)</sup>を参考にすることとした。具体的には、ある年に布設した複数スパンのうち1年目、2年目・・・n年目までの毎年の改築される割合をR<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>・・・R<sub>n</sub>とした時のn年目の管きよ生存率を以下の式で計算する。

$$\begin{aligned}
 n \text{ 年における管きよ生存率} &= \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \\
 &= (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times \cdots \times (1 - R_n)
 \end{aligned}$$

ここに、R<sub>i</sub> = 経過年数毎の改築率

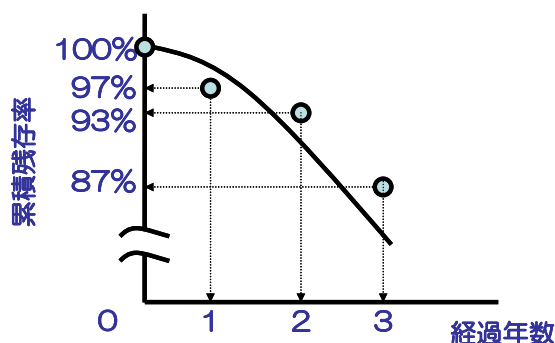
簡単な例を使って説明する。表－３のように、ある年度において、経過年数 1 年の管が年度はじめに 1500m あったとき、その年度内工事で 45m 改築を行ったとする。

表－3 管きょ生存率の計算例

○年度工事において

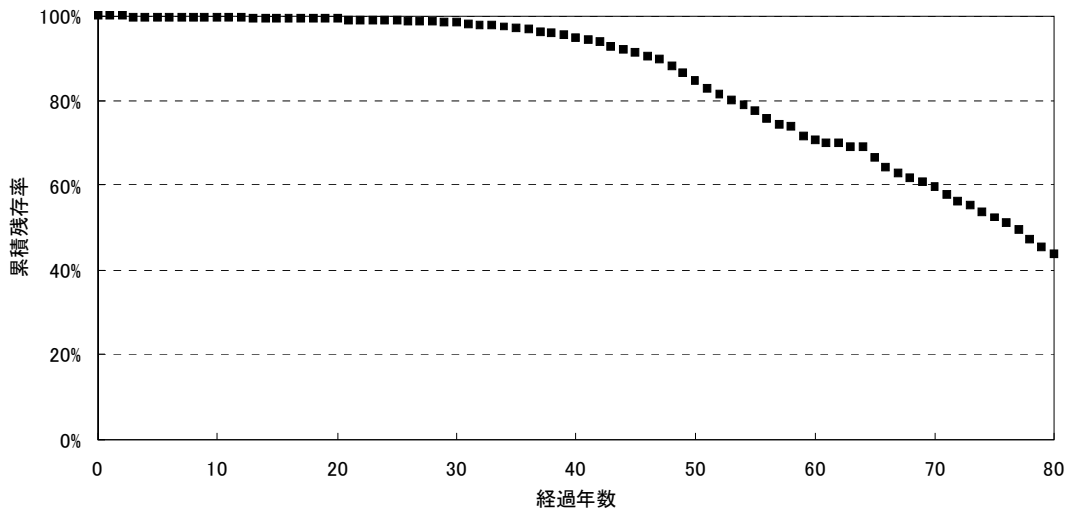
経過年数 (年)	管理延長 (m)	改築延長 (m)	改築率 (%)	残存率 (%)	管きょ生存率 (%)	
1	1,500	45	3	97	97	
2	3,000	135	4.5	95.5	93	=0.97×0.955
3	4,000	240	6	94	87	=0.97×0.955×0.94

もちろん、施工直後に改築することはまずあり得ないので、あくまで例として受け取って頂きたい。この場合、1歳の管の改築率は3% (=45/1500) となる。この時、1歳の管が2歳になる割合、つまり1歳の管の残存率は97% (=100%-3%) となる。同様に2歳の管、3歳の管の年度初めの管理延長、改築延長が表－3のであったときのそれぞれの経過年数での残存率は95.5%、94%となる。これにより1歳の管が3歳になる割合は、1歳の管が2歳になる割合(1歳の残存率)と2歳の管が3歳になる割合(2歳の残存率)の掛け算と見なしうるので、この例では93% (=0.97×0.955) となる。これを2歳の管の管きょ生存率という。同様に3歳の管の管きょ生存率は87% (=0.97×0.955×0.94) と計算される。横軸に経過年数、縦軸に管きょ生存率をプロットし、適当な近似式を描いた場合、これを生存曲線と呼ぶこととしている(図－3)。



図－3 生存曲線の例

実際のデータを用いた結果を図－4に示す。図中の管きょ生存率は、管理延長および改築延長について、各管種(陶管、コンクリート管、塩ビ管)とその他の管種の総和を用いて計算したものである。



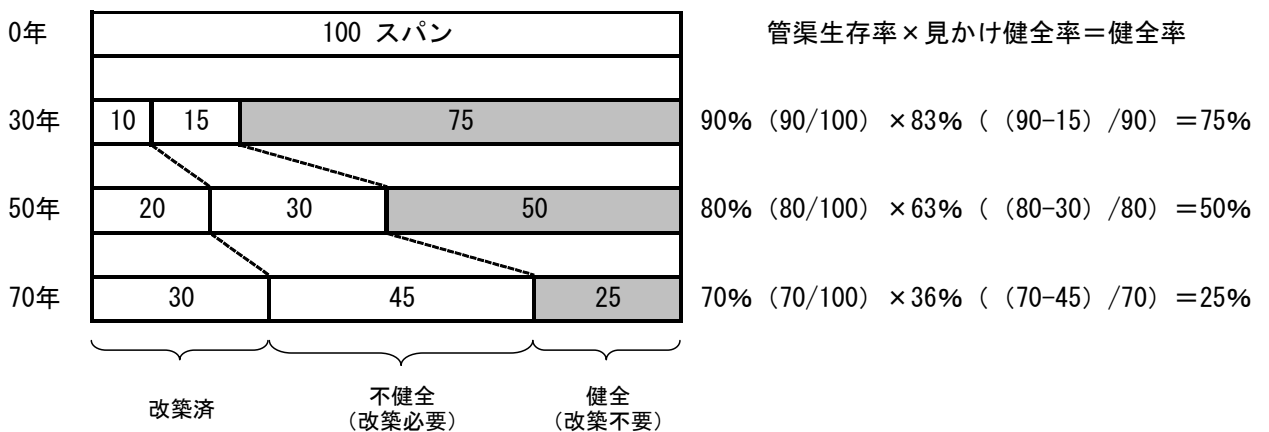
図－４ 実データによる管きよ生存率

これは、平成 17～19 年度まで毎年度、全国の年度初めの管渠資産延長に対する年度内での改築延長の割合を自治体ごとにアンケート調査し、年度毎に経過年数毎の改築率を計算したものを 3 カ年分算術平均した改築率に基づき、管きよ生存率を計算しプロットしたものである。

### 2-3 補正後の健全率と健全率予測式

見かけの健全率は、管きよ生存率と掛け合わせることで、補正される。見かけの健全率は、改築されずに残存した管に対する劣化管の割合を示している。従って、見かけの健全率に管きよ生存率を乗じたものが、改築を実施しない場合の正味の健全率となる。これは、改築された管はすべて劣化があったとの仮定に基づいている。

例を使って説明する（図－５）。



図－５ 健全率の計算例

ある年度に 100km の管を布設したとする。この 100km のうち 30 年後、50 年後、70 年後までに改築済みとなった延長はそれぞれ 10km、20km、30km であったとする。これは経過年数 30 年、50 年、70 年の管きよ生存率が 90% ( $= (100-10)/100$ )、80% ( $= (100-20)/100$ )、70% ( $= (100-30)/100$ ) であったということである。さらに 30 年目に仮に改築されずに残存していた管きよの 90km の全てを調査したところ、うち 15km が劣化あり（緊急度 I または II）だったとする。同様に 50 年目に改築されずに残存していた管きよの 80km の全てを調査したところ、うち 30km が劣化あり（緊急度 I または II）だったとする。70 年目に改築されずに残存していた管きよの 70km の全てを調査したところ、うち 45km が劣化あり（緊急度 I または II）だったとする。これらのケースの 30 年目、50 年目、70 年目の見かけの健全率は 83% ( $= (90-15)/90$ )、63% ( $= (80-30)/80$ )、36% ( $= (70-45)/70$ ) である。30 年目、50 年目、70 年目までに改築されてしまった延長分は 30 歳、50 歳、70 歳時点での管きよ調査対象とはなりえない。実際に長期の改築事業量を予測するためには、すでに改築されてしまった延長分もあわせて予測する必要がある。改築されてしまった延長も考慮した補正後の健全率は管きよ生存率と見かけの健全率を乗ずることによって得られる。この例では 30 年目、50 年目、70 年目の補正後の健全率は 75% ( $= 90\% \times 83\%$ )、50% ( $= 80\% \times 63\%$ )、25% ( $= 70\% \times 36\%$ ) となる。図-5 において、100km のうち、劣化なしの健全管として残っている延長は 30 年目、50 年目、70 年目でそれぞれ 75km、50km、25km であり、補正後の健全率はこれらの延長の当初延長に対する割合を示している。

見かけの健全率と管きよ生存率を得る際に用いたデータと同じデータを使用した補正後の健全率と直線近似による健全率予測式を図-6 に示す。

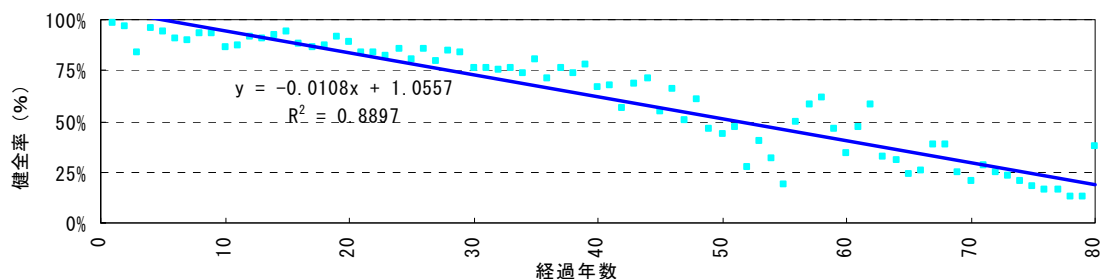


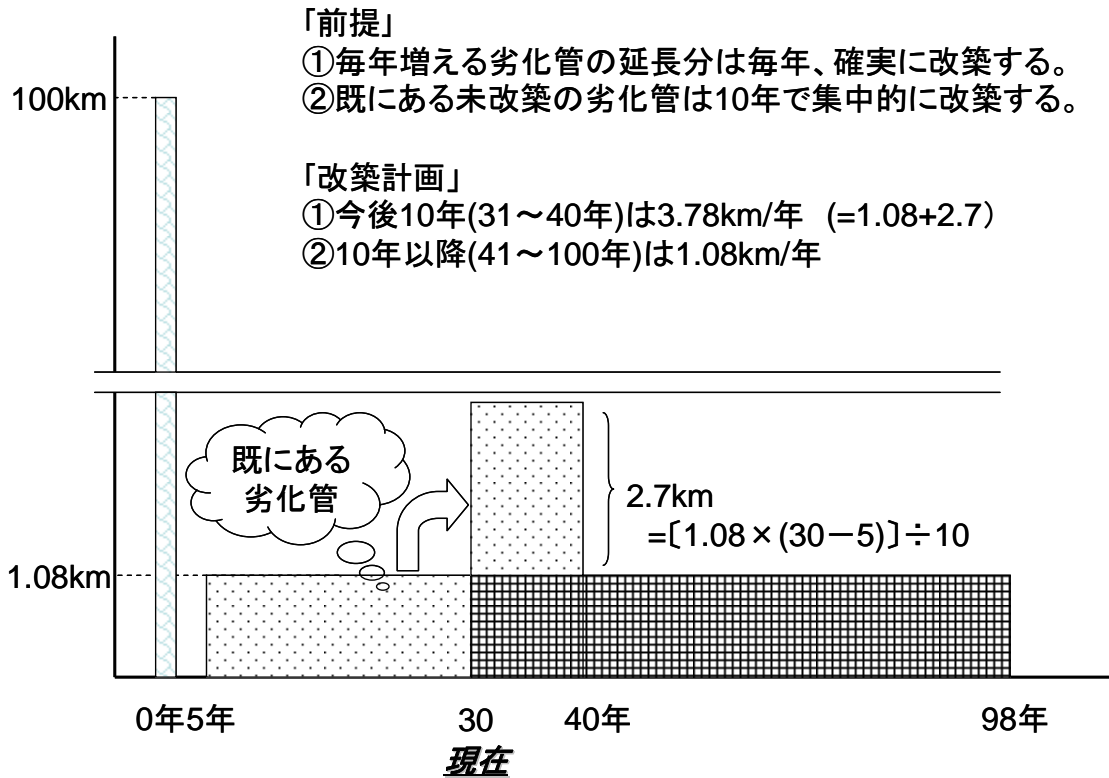
図-6 健全率と健全率予測式

### 3. 改築必要延長予測

#### 3-1 考え方

図-6 の健全率予測式を用いて改築事業量を推計する手法を提案する。基本的な考え方は緊急度 I または II に相当する劣化した管は速やかに改築するということである。具体的手法は図-7 の例を用いて説明する。

### 30年前に布設した100kmの管きよの改築事業計画



**実際の計画は、管種別、布設経過年毎に上記を合算する。**

図-7 健全率曲線による改築事業量の推計

30年前に布設した（当初布設から現在までの経過年数が30年の）100kmの管きよの改築事業計画を考える。前提として、以下の3点を仮定する。

- ①毎年増える劣化管の延長分は毎年、確実に改築する。
- ②既にある未改築の劣化管は10年で集中的に改築する。

まず、毎年、劣化管はどれくらい増えるのかについては、図-6の健全率予測式の傾きより1.08% (0.0108)となる。100kmを母数としているので延長にすると1.08kmとなる。次に、いつからこのような劣化管が発生するのかは、健全率予測式が100%となっているところの経過年数である5年  $(= (1.0557 - 1) / 0.0108)$  となる。さらに、いつまで劣化管が発生し続けるかについては、健全率予測式がx軸と交わる、つまり補正後の健全率が0%となる経過年数である98年  $(= 1.0557 / 0.0108)$  となる。経過年数30年目の現在において、手付かずのままとなっている劣化管の延長は27km  $(= 1.08 \times (30 - 5))$  となる。「既にある未改築の劣化管は10年で集中的に改築する」としているため、既にある未改築の劣化管に対する毎年の改築延長は2.7km  $(= 27 / 10)$  となる。既にある未改築の劣化管以外にも、劣化管は毎年1.08km増える。但し、増えるのは経過年数98年目までである。よって改築事業計画は、今後10年(経過年数31年～40年)は3.78km/年  $(= 1.08 + 2.7)$ 、10年以降(経過年数41年～98年)は1.08km/年となる。実際の改築事業計画では、管種別、布設経過年毎に上記を合算し、計画



を立てる。

### 3-2 具体例

さらに具体的な事例を用いて改築必要延長の予測方法を解説する。

#### (1) 予測条件

予測期間は、改築必要延長の将来予測にあたり、100年程度の寿命を持つ管渠も存在すること、および2巡目の改築を考慮することを念頭において200年とした。予測に用いる布設経過年数別の管渠延長は、今後の新設管渠は含まないこととし、**図-8**の管きょ資産(のべ406km)を有するモデル都市で検討した。尚、モデル都市は全国の管きょ資産の1/1000である。

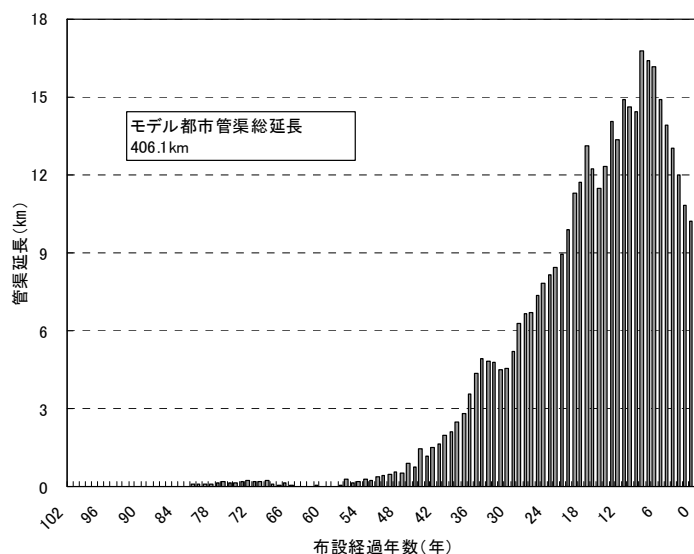
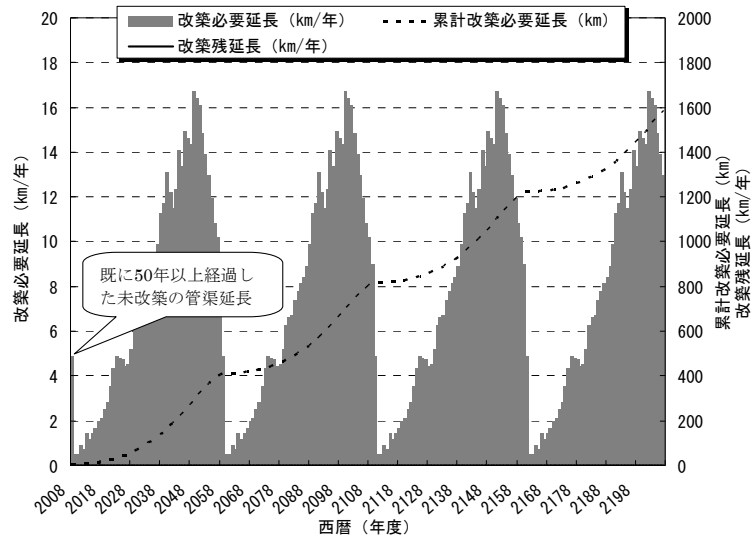


図-8 モデル都市における布設経過年数別管渠延長

また、予測に際して適用した改築のシナリオは、「健全率予測式を用いた場合」とし、比較対象として「標準耐用年数50年で改築した場合」も設定した。なお、健全率予測式を用いた場合は、緊急度I+IIの不具合発生と同時に速やかな改築実施を想定した。また、このシナリオの場合は、既に存在している未改築の改築必要延長が予測初期で大きくなるため、これらは初期対応として10年で均等に解消するシナリオとした。一方、標準耐用年数50年の初期対応については、布設経過年数50年以上の管渠を初年度の1年間で改築するシナリオとした。

#### (2) 予測結果および考察

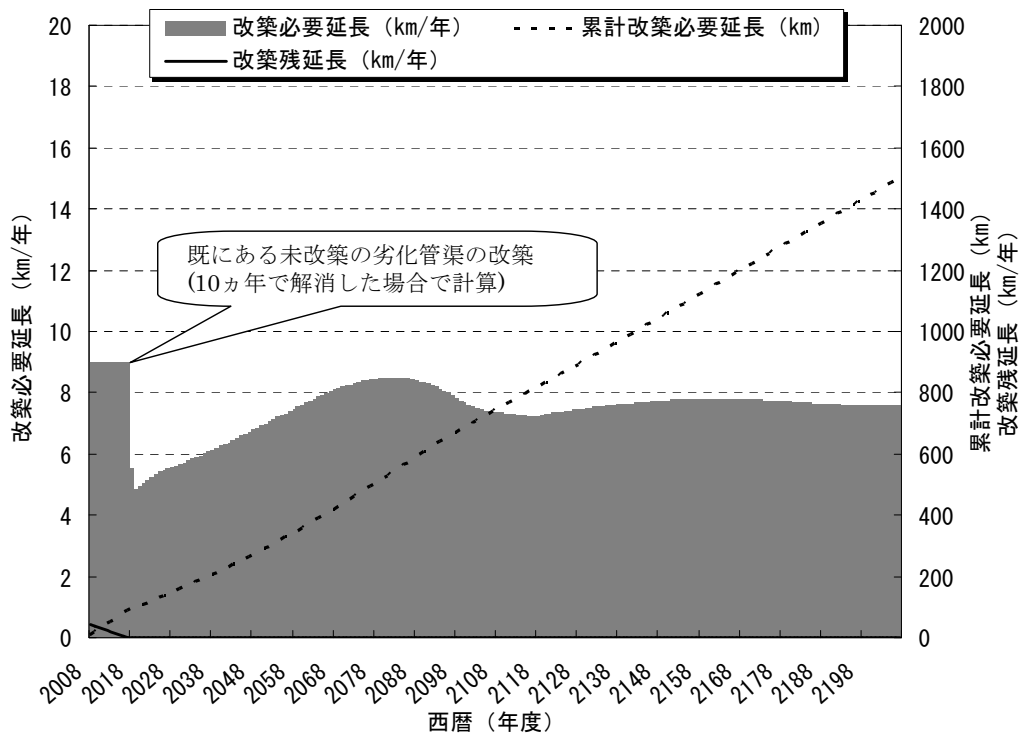
図-9に標準耐用年数50年で改築した場合の改築必要延長の将来予測結果を示す。



図－9 標準耐用年数50年の場合の改築必要延長予測

各年度の改築必要延長に着目すると、年度ごとに延長が大きく変動する傾向を示し、最大値はモデル都市全体における管渠総延長406kmの約4.1%/年（16.8km/年）、最小値は約0.1%/年（0.5km/年）となった。また最大と最小の差（以下、延長変動幅と示す。）は約4.0%/年（16.3km/年）となり、変動回数も多くなる結果を示した。累計改築必要延長に関しては、予測期間で約1,582kmとなった。

図 - 10 に健全率予測式を用いた場合の予測結果を示す。



図－10 健全率予測式による改築必要延長予測

初期対応（2017年度）以降における各年度の改築必要延長は、最大で約2.1%/年（8.5km/

年)、最小で約 1.2%/年 (4.9km/年) を示し、延長変動幅は約 0.9%/年 (3.6km/年) となった。累計改築必要延長は、約 1,500 km となった。この結果、直線式型を用いた場合は、標準耐用年数 50 年の場合と比べて予測期間での累計延長や変動回数が少なくなり、延長変動幅も小さくなる傾向を示した。したがって、健全率予測式を用いた場合は劣化管渠を明確に把握できることに加え、改築必要延長が平準化されることが示された。

#### 4. 管種別健全率曲線

管種について、当研究室では陶管、コンクリート管、塩ビ管に分けて調査している。図-11~12に陶管、コンクリート管の健全率曲線を示す。管種ごとの健全率の推移に差異があるため、改築必要延長の予測にあたっては、3. の手順を管種ごとに実施し、管種別に改築必要延長を予測することが望ましいと考える。尚、塩ビ管の健全率曲線を示さない理由については5. で言及する。

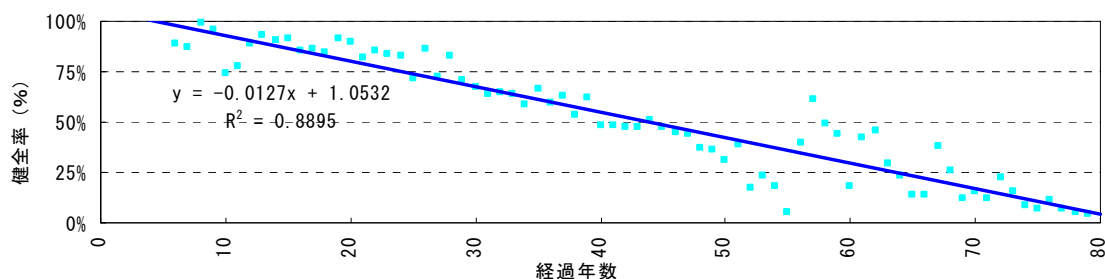


図-11 陶管の健全率予測式

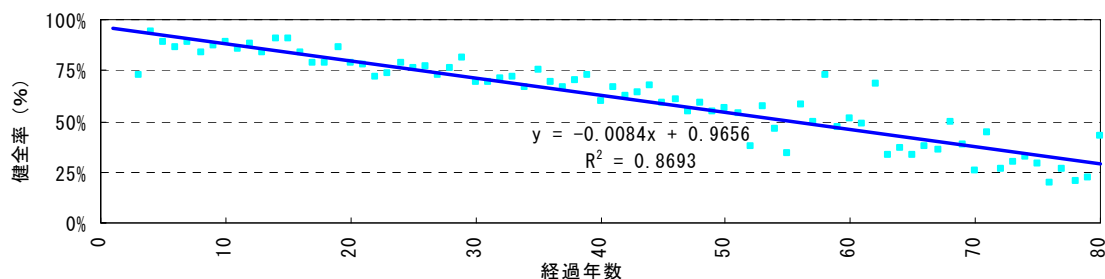


図-12 コンクリート管の健全率予測式

## 5. まとめ

ここで示した提案手法を実施するに当たり、各自治体が自らのデータを用いて管種別に健全率予測式を作成し、将来の事業費を予測することを基本と考えている。しかしながら、多くの自治体では、調査データの十分な蓄積がない。そこで当研究において、標準的な健全率予測式を管種別に提示した。改築事業費の予算が確保され、実際の事業執行に移されるようになると、その前段として、調査が実施される。これにより調査データの蓄積が行われ、やがては各自治体で健全率予測式が計算できるようになると期待する。

管種別の健全率の推移について、塩ビ管の結果は示さないこととした。この理由は以下の通りである。まず、陶管、コンクリート管は経過年数 80 年に及ぶデータがあるが、塩ビ管については、陶管、コンクリート管と比べ歴史が浅いため 40 年強のデータしかない。少ないデータ数に対して描いた健全率予測式の重相関係数は陶管、コンクリート管と比べ著しく小さかった (0.23)。塩ビ管の健全率予測式は他の管種に比べ優れた傾向を示しているが、これは現在の診断基準がクラック等、剛性管 (陶管、コンクリート管) に特有な劣化現象を対象としているのに対し、断面のたわみ等、塩ビ特有な不具合項目が含まれていないことが一因であると考えられる。実際、塩ビ管の断面に扁平が見られるという伝聞情報もある。可とう性の塩ビの場合、扁平即破壊となるとは考えられないが、断面縮小の問題が生じるので注意を要する。これらから、塩ビ管の健全率予測式を他の管種に比べ信頼性が劣り、かつ楽観的すぎる結果となっている可能性があるため、ここで紹介するのは危険と判断した。

ここで示した健全率予測式には、作成手法に過小 (危険)、当研究で用いたデータに過大 (安全) の仮定が含まれている。見かけの健全率計算に当たり、テレカメ等の調査結果を用いることは、過小評価である。実際は、テレカメ調査時点以前に劣化が発生しており、たまたま調査のタイミングで劣化が見つかったものである。一方、本稿で示した実際のデータの累積残存率計算には、能力増強や道路改良のための劣化以外の理由による改築も含まれており、過大となっている。これらは今後の課題である。

本稿の冒頭に法定耐用年数の 50 年に説得力がないと書いたが、結果的には図-6 の健全率予測式の補正後の健全率が 50% となるのは約 50 年であり、概ね法定耐用年数と現在の管きよの耐用年数の平均は一致している。

老朽管の改築については、事業の平準化が問題とされている。しかし、同じ時期に埋設された管きよが同時に劣化するわけでない。我々の研究成果は、劣化管の発生量に見合った改築事業を確実に実施すれば、平準化の問題は解消されることを示している。より重要なのは、改築が必要となるようなスパンが布設後間もなく発生することである。もちろん一方で 100 年近くもつ管もある。しかし、法定耐用年数の 50 年後まで改築に手をつけないとすれば、50 年後には資産の約半分が不良化し、大きな負担を後世に引き継ぐこととなる。

今回の解析に利用した調査データは公共下水道であり、かつ大都市が中心である。劣化のメカニズムや進行速度に差があると想定されるため、改築必要延長の予測精度をより向上させるためには、合流と分流の別、幹線と枝線の別に解析することが必要と考えている。

併せて、大都市以外の公共下水道管の調査データの収集も必要と考えており、今後もデータの収集を図ることとしている。

#### 参考文献

- 1) 点検・調査結果の判定及び診断, 下水道維持管理指針(前編)-2003年版-, pp122-125, (社)日本下水道協会, 2003年8月
- 2) 緊急度の判定, 下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル(案), pp27-30, (社)日本下水道協会, 2007年3月
- 3) 日本人の平均余命, 厚生労働省大臣官房統計情報部, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life06/index.html>, 平成21年1月5日現在