

テレビカメラ調査診断結果による下水管きよの劣化予測

中日本建設コンサルタント（株） 水工技術本部 中根 進

1. はじめに

管きよに生じる劣化の進行を予測することは、下水道施設の中に占める管きよ施設の資産割合が大きいことから、下水道アセットマネジメントのための重要な要素技術である。下水道区域の拡張に伴い、民間で開発した住宅団地を公共下水道に取り入れる例も多くある。その際、既設汚水管きよの劣化度を把握して、今後、どの程度の補修費が必要か、また、団地の一部を調査して団地全体の劣化を把握できないかなどの声も聞く。

筆者は、民間開発団地のテレビカメラ調査の診断結果を利用して汚水管きよの劣化進行予測を試みた。

この劣化予測技術を用いれば、公共下水道事業で布設した管きよの劣化予測も可能であると考えた。

面整備管きよなどの小口径管きよでは、管きよを掘り上げて調査する以外、供試体を採取できないので、中性化試験や強度試験などの物理試験が困難である。テレビカメラ調査による診断結果が管きよの劣化(老朽化)を示しているものと考え、劣化予測するものとした。

2. テレビカメラ調査

2.1 テレビカメラ調査対象団地

平成13年から18年にかけて実施した団地汚水管のテレビカメラ調査の診断結果をもとに、管きよの劣化予測を行う。調査した団地は昭和44年から56年にかけて民間開発によって造成された9団地で、規模としては開発面積約2~44haである。A~D団地の管きよは団地の全域、E~H2団地はその一部区域を調査診断した。調査団地は、一部団地に塩ビ管が布設されていたが、大部分はヒューム管（以下HP）であった。

2.2 テレビカメラ調査診断結果

テレビカメラによる汚水管きよの調査診断結果のうちHPのみ表-1に示す。

テレビカメラ調査は、「下水道施設改築・修繕マニュアル(案)」¹⁾をもとに表-2の項目で診断し、その結果を用いて劣化判定を行った。診断方法は、「劣化度」、「流下能力」、「浸入水」の大項目について、その細目（破損、クラック、ズレなど）ごとにその大小、多少を劣化の程度と考え、劣化の大きいほうからA、B、Cの判定を行った。なお、カメラ調査から破損、クラックなどが認められなかったものは、D判定とした。

表-1 民間団地テレビカメラ調査診断結果

団地名	経過年数	調査スパン数	劣化スパン数	劣化別スパン数				劣化割合			
				IV	III	II	I	IV	III	II	I
A	31	219	219	0	164	22	33	0	0.749	0.1	0.151
B	27	110	110	0	88	8	14	0	0.8	0.073	0.127
C	30	15	15	0	12	2	1	0	0.8	0.133	0.067
D	20	34	34	0	22	5	7	0	0.647	0.147	0.206
E	26	31	30	1	9	14	7	0.032	0.29	0.452	0.226
F	21	3	3	0	0	2	1	0	0	0.667	0.333
	22	11	11	0	3	6	2	0	0.273	0.545	0.182
	29	2	2	0	0	1	1	0	0	0.5	0.5
	30	3	3	0	0	0	3	0	0	0	1
	32	6	6	0	1	3	2	0	0.167	0.5	0.333
G	37	16	15	1	0	0	15	0.063	0	0	0.938
H1	33	70	70	0	14	16	40	0	0.2	0.229	0.571
H2	36	461	416	45	101	121	194	0.098	0.219	0.262	0.421
計		981	934	47	414	290	320	0.048	0.422	0.204	0.326

表-2 診断項目¹⁾

診断項目	診断ポイント	
劣化度	破損・クラック	管の変形・断面のずれ、クラックの状況
	腐食	骨材・鉄筋の露出状況、管壁の状況
	継手ずれ（接合不良）	接合部のすき間、ずれの状況
流下能力	たるみ・蛇行	たるみ・蛇行の程度（管径比）、流下状況
	取付け管の突出し	突出しの程度（管径比）、流下阻害状況
	樹木根の侵入	侵入の程度（管径比）、流下阻害状況
	モルタル・油脂の付着	付着の程度（管径比）、流下阻害状況
浸入水	噴き出し、にじみの状況	

劣化予測には、劣化に係わらない要素（施設的重要性、復旧の難易度など）を除外した。また診断項目の大項目のうち「浸入水」については、「劣化度」、「流下能力」の細目が原因となった現象ととらえ、「劣化度」、「流下能力」の細目のA、B、C判定から劣化度を判断した。

さらにスパンごとの判定（A、B、C）の多少をもとに、緊急度の高い順にI、II、IIIに分類した。この緊急度に劣化度（I、II、III、IV）が対応すると考えた。劣化度IVは、劣化がない状態で、布設時の状態とする。

3. 劣化発見率

国土交通省国土技術政策総合研究所 宮内 千里ほかは、管きよの調査診断結果から調査年に劣化を認めるとき、調査スパン数に対する劣化スパン数を劣化発見率²⁾としデータを整理している。その報告の一部を図-1に示す。図-1によると、合流式管きよのHPの劣化発見率は、年々増加する傾向にある。

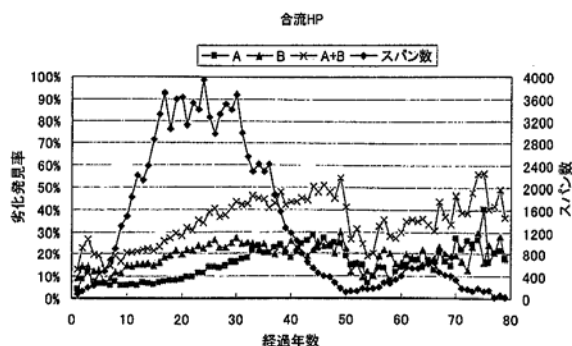


図-1 合流管の劣化発見率の一例²⁾

A判定とした劣化発見率は、経過年数15年までは一定値でそれ以降は増加に転じている。B判定は、25年まではほぼ一定に増加している。これらの劣化発見率の勾配は、劣化速度と考えられる。

この劣化発見率は、ある経過年数において管きよ全体に占める劣化している管きよの割合を示し、A判定、B判定の劣化発見率は、経過年数による管きよの劣化度の割合（A判定、B判定、劣化なし）と考えることができ、何らかの関数（劣化進行、予測）で表すことを考えた。

4. 劣化速度

4.1 劣化曲線の算出手法

9団地のHPで劣化度I判定と(I+II+III)判定したスパンに対して式(1)で信頼度を算定した。その結果を図-2に示す。この信頼度の曲線は、管きよの劣化曲線といえることができる。

I判定したスパンが必ずしも布設替を前提としたようなスパン全長の補修を必要とするものではないが、I判定したスパンが概ね管きよの寿命に達していると考え、寿命は45年前後となる。

$$\text{信頼度} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{調査スパン数}_i - \text{劣化スパン数}_i}{\text{調査スパン数}_i} \dots (1)$$

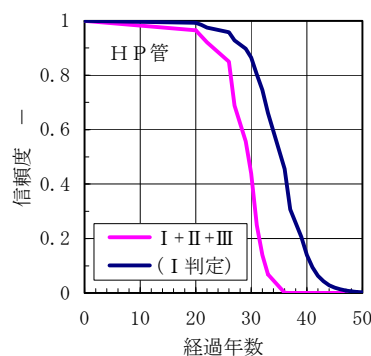


図-2 9団地の污水管劣化曲線

4.2 劣化速度の算出

ある調査時点での経過年数tにおける劣化発見率をrとし、次の調査時点での経過年数t'における劣化発見率をr'とする。劣化速度yは時間t-t'で線形であると仮定し、劣化発見率の変化率として表すものとする²⁾。

$$\text{劣化速度} y = \frac{r' - r}{t' - t} \dots \dots \dots (2)$$

本調査は表-1の9団地全域ではなく、その一部について調査を行ったものである。H1、H2については同じ団地内でも調査年次によって調査場所が異なるものである。公共下水道であっても、同一地域の管きよを定期的にテレビカメラ調査することはきわめてまれであり、同一管きよを複数年調査して、その診断結果から管きよの劣化速度を求めることはできない。

今回の団地調査結果は、すべての管路で布設後、初めてのテレビカメラ調査である。経過年数による劣化は、図-1のように管径、土被りや埋設地盤などの埋設条件が異なっても、どの団地の管きよも同じ挙動を示すものと仮定し、式(2)よりI判定の劣化速度を算出し、図-3に示す。

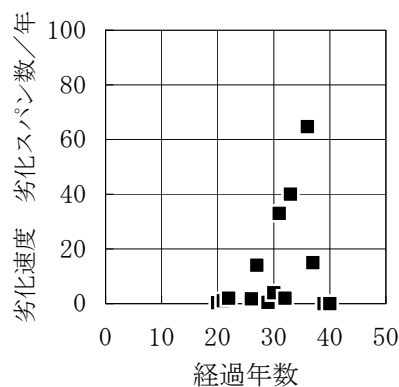


図-3 経過年数とI判定劣化速度

図-4は、一般的な経過年数と劣化度の関係³⁾を示し、1)劣化速度が速くなる(経過年数の増加とともに劣化度が大きくなる)、2)劣化速度が一定、3)劣化速度が遅くなることを表している。

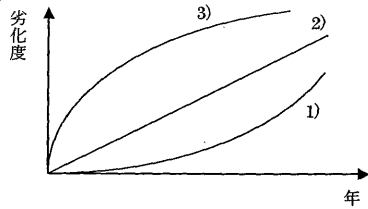


図-4 劣化パターンの形式

図-4の劣化パターンを劣化速度で示せば図-5となる。

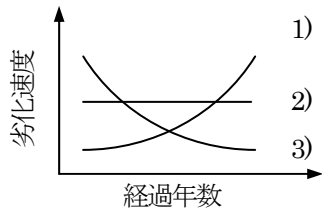


図-5 劣化速度のパターン

調査結果の図-3は、経過年数の増加とともに劣化速度が年々速くなる傾向があり、経過年数に対するI判定の劣化度および劣化速度の関係は、図-4および図-5の1)を示すと考えられる。

5. マルコフ連鎖を用いた劣化予測

5.1 管きよの劣化モデル

筆者は、図-1の劣化発見率と経過年数との傾向からマルコフ連鎖という確率的な考えを用いて管きよの劣化の進行を再現することを考えた。

マルコフ連鎖の確率⁴⁾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IV・III・II・I)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。推移確率 χ は、カメラ調査の結果が同一管きよを定期的に行った結果でなく、一回だけの結果であることから、経過年数によらず一定であると仮定した。マルコフ連鎖による劣化の概念を図-6に示す。

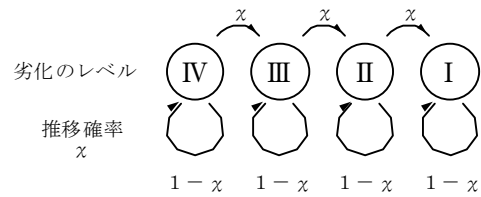


図-6 マルコフ連鎖による劣化の概念

マルコフ連鎖の概念図に示した劣化過程を式(3)に示す。ある単位時間Tで時間が経過した時の劣化度の推移を表すものである。

$$\begin{matrix} & \text{IV} & \text{III} & \text{II} & \text{I} \\ \text{IV} & \begin{bmatrix} 1-\chi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & & \\ \text{III} & \begin{bmatrix} \chi & 1-\chi & 0 & 0 \end{bmatrix} & & & \\ \text{II} & \begin{bmatrix} 0 & \chi & 1-\chi & 0 \end{bmatrix} & & & \\ \text{I} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & \chi & 1 \end{bmatrix} & & & \end{matrix} \dots\dots\dots(3)$$

一方、管きよ布設時の劣化度の各レベルの割合を式(4)に示す。布設時には、劣化がないので劣化レベルIVの割合が1で他の劣化レベルが0であると考える。

$$\begin{matrix} \text{IV} \\ \text{III} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

式(4)で表された布設直後の管きよが、単位時間Tでn回分経過した後の劣化度の分布を式(5)で表わす。この式(5)が劣化の進行を表す式であり、単位時間Tは1ヶ月、2ヶ月…1年などに設定する。以降、式(5)を劣化進行式または劣化予測式とする。

$$\begin{bmatrix} \text{IV} \\ \text{III} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\chi & 0 & 0 & 0 \\ \chi & 1-\chi & 0 & 0 \\ 0 & \chi & 1-\chi & 0 \\ 0 & 0 & \chi & 1 \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

5.2 劣化進行モデルの種類

式(5)で表した劣化進行モデルに対し、単位時間Tを1年とし、推移確率 $\chi=0.1$ としたとき、経過年数tの劣化度の分布は図-7のようになる。

図-7は劣化度が4つのレベルであるが、経過年数による劣化度の割合の変化を示し、図-1に対応する。図-7の経過年数t時の劣化度割合の傾きが劣化速度になる。図-7の劣化分布で下に凸の部分が年々劣化速度の増加を表す。図-1の

ように調査データが時系列にある場合は、予測値と調査診断値の差が最小となる単位時間Tと推移確率 χ を最小二乗法で求めることができる。

ある1つの劣化分布を表す場合、単位時間Tと推移確率 χ は、相対的な関係にあり、単位時間Tを小さくとれば、推移確率 χ も小さくすることが必要である。分布の形状は、劣化レベルの数によっても異なってくる。

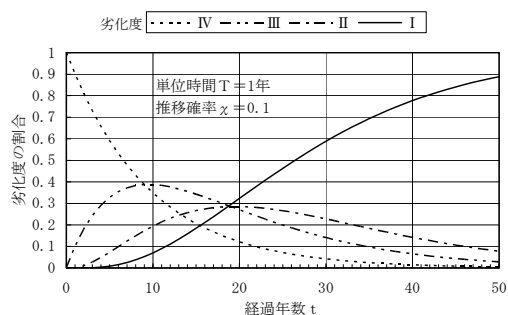


図-7 推移確率一定の劣化分布

単位時間Tを1年として推移確率 $\chi = 0.01, 0.1, 0.2$ と変化させた場合の $t = 10$ 年経過後の劣化度の分布を図-8に示す。団地のように管きよの施工年度が同じ調査データしかない場合、図-8で表現する。

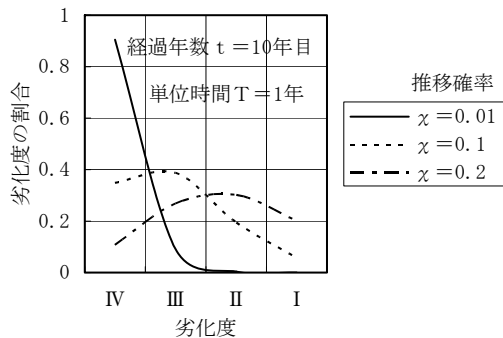


図-8 推移確率 χ を変数とした劣化分布

調査診断値を図-7または図-8の曲線に一致させることが、劣化進行の予測式を導くことになる。

5.3 劣化予測式の推移確率 χ

単位時間Tと推移確率 χ を仮定し、式(5)に代入し劣化スパン数を算出し、トライアルで診断結果の劣化度 (IV・III・II・I) に対するスパン数と一致させる。調査診断した劣化スパン数と一致した単

位時間Tや推移確率 χ を用いて、劣化の進行を数式化 (モデル化) する。図-8の劣化分布を推定する場合には、単位時間Tを変化させると相対的に推移確率 χ も変化し、精度も向上するが、異なる団地などの相対的な比較のため、本報告では単位時間T = 1年で統一した。

調査スパンが25スパンと少ないが、管きよの布設年が異なり、経過年数が21年から32年のデータがあるF団地のHPについて、単位時間T = 1年として経過年数の異なったデータごとにトライアルで推定値と調査診断値を一致させ、推移確率 χ を算定した。その結果を図-9に示す。

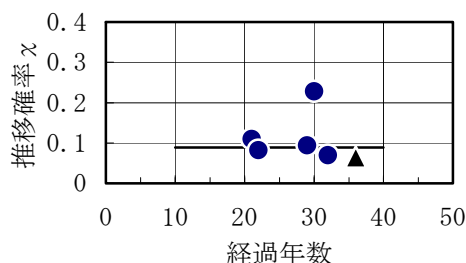


図-9 F団地の推移確率

経過年数30年を除いて推移確率 χ は、ほぼ一定の値 (0.089) を示した。精査すると30年のデータは調査スパン数が3スパンしかなく、また布設年次も聞き取りによる推定値であったので除外できるものと考えた。後述するH2団地の χ を▲で示す。これらのことから推移確率 χ は一定の傾向と考える。これについては、「5.6 公共下水道の解析事例」にも示す。

各経過年数の推移確率 χ を求めるに当り、式(6)に示す調査診断値と予測値の差が最小になるように最小二乗法を用いて求める。

$$\text{二乗平均平方和誤差} = \frac{1}{\text{Range}} \sqrt{\frac{\sum (\text{予測値} - \text{調査値})^2}{\text{データ数}}} \times 100 \quad \dots\dots(6)$$

ここに Range : 経過年数毎の最大調査診断値とする。

5.4 劣化進行モデルの適用

本報告では、布設後36年経過したH2団地の汚水管きよ (管種:HP, 内径:250~450mmで250mmが主体) を例に劣化予測式を推定する。

5.3 から推移確率 χ は一定であるとみなして差

し支えないと考えた。単年度の調査診断結果から単位時間 $T=1$ 年として推移確率 χ をトライアルで設定し、各々の劣化度に対する劣化スパン数を計算し、予測値と調査診断値の差が最小になるよう推移確率 χ を決定する。その結果は、図-10に示すとおり、推移確率 $\chi=0.065$ となった。

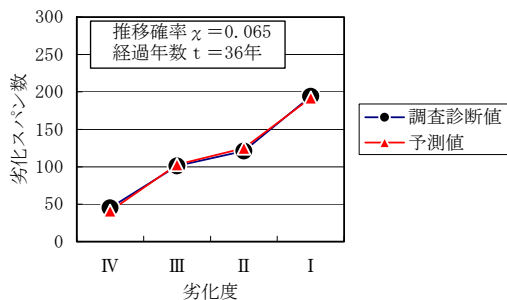


図-10 調査診断結果と予測劣化スパン数

この推移確率 $\chi=0.065$ を用いて、36年経過した管きよを更新・修繕せずにさらに10年間放置した場合の劣化の進行を予測した結果を図-11に示す。

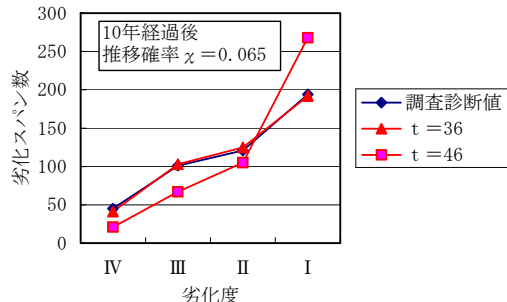


図-11 調査時点から10年経過後の劣化予測

図-11によれば、劣化度II, III, IVのスパン数が減少して劣化度Iのスパン数が著しく上昇することがわかる。

式(5)の劣化予測式を用いて、劣化調査スパン数に対する劣化度に応じた劣化スパン数の比を「劣化度の割合」として、経過年数との関係を示すと図-12となる。

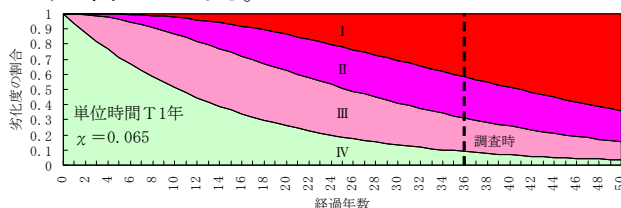


図-12 H2団地経過年数と劣化度の割合
耐用年数といわれる布設後50年を経過すると、

劣化のない管きよ(劣化度IV)は約3%程度となり、劣化度Iの占める割合が64%程度に達すると推定できる。

次に、劣化度III・II・Iの管きよに要する更新・修繕費用を明らかにすれば、劣化を放置することによる経済的な損失も推定できる。

調査区域を一例として、調査年に修繕した場合と、調査年から10年経過後に修繕した場合の工事費を表-3に示す。劣化を放置することによる損失は、17,662千円となった。なお表-3の工事単価は、カメラ調査後、H2団地について破損・クラックなどをライニングによる部分補修や全面補修で直すものとして、平成18年度単価で積上げや見積をとって算出した工事費を劣化度別に再集計し、劣化度毎の延長で除して劣化度別のm当り単価とした。

表-3 劣化放置による経済的損失例

劣化度	実測値t36年				10年経過後t46年			工事費差 千円	
	スパン数	延長 m	スパン当り 管きよ長 m	m当り 単価 円	工事費 千円	スパン数	延長 m		工事費 千円
IV	45	920	20.4	0	0	21	428	0	
III	101	2,389	23.7	8,000	19,112	67	1,588	12,704	-6,408
II	121	4,940	40.8	37,000	182,780	105	4,284	158,508	-24,272
I	194	3,003	15.5	42,000	126,126	268	4,154	174,468	48,342
計	461	11,252			328,018	461	10,454	345,680	17,662

また、調査年から劣化度Iと判定した管きよのみを毎年20%ずつ5年かけて修繕したと仮定した劣化曲線を図-13に示す。修繕後に劣化度II・IIIから劣化度Iに劣化が進行するので、信頼度はあまり回復せず、10年程度延命した結果となる。

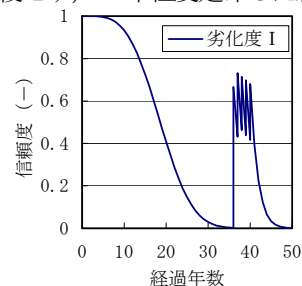


図-13 5年かけて修繕した場合の劣化曲線

5.5 H2団地劣化予測式によるH1団地の劣化予測

H2団地とH1団地は同じ団地であるが、調査年と管きよの布設場所が異なる。H1団地の管きよの劣化度をカメラ調査せずに、H2団地の劣化予測式(単位時間 $T=1$ 年、推移確率 $\chi=0.065$)により予測することを想定する。実際には調査診

断済みであるので、その結果と比較し、未調査部分を予測することが可能か試みる。

H1団地の診断値とH2団地の劣化予測式から予測したH1団地の劣化度を図-14に示す。二乗平均平方和誤差は20.4%あり、この精度を上げることが今後の課題である。推移確率 χ と管径や土被りというような埋設条件との相関を見出せれば、未調査区域の劣化も予測できると考えられる。また、精度が向上すれば、改築修繕計画の立案も可能と考えられる。

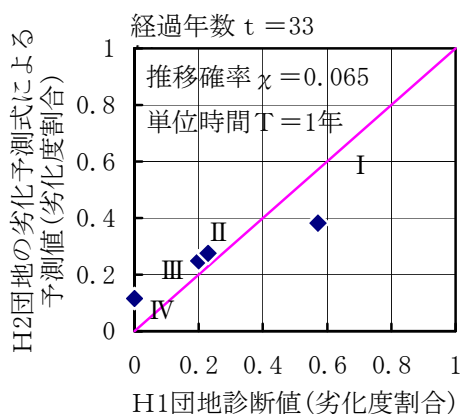


図-14 未調査管きよの劣化予測

5.6 公共下水道の解析事例

図-1の合流管の劣化発見率からA, B判定の劣化発見率を読み取り、合流式管きよの劣化予測式を立てる。C判定の診断結果もあると思われるが、図には示されていないので、C判定は劣化なしとし、劣化度を3つのレベルで単位時間 $T=1$ 年として推移確率 χ を求める。

劣化発見率は、経過年数10年から40年の間に単年で6年分を読み取り、各々10年、15年…40年経過した合流管の劣化度データとした。図-1の経過年数50年前後は、戦後(1940~1950)に埋設された管きよで施設延長が少ないと報告²⁾されていること、JSWAS A-1のHP規格の制定が昭和44年(1969)であり、図-1の調査年は不明であるが、この規格で製造された管の経過年数が40年程度であろうと推定した。

推移確率 χ は、単位時間 $T=1$ 年で各経過年数毎に算定した結果、図-15に示すとおりで、概ね一定値となった。二乗平均平方和誤差は、最大で12%程度であった。合流式管きよでも、污水管きよと同様に推移確率 χ は一定であった。

よと同様に推移確率 χ は一定であった。

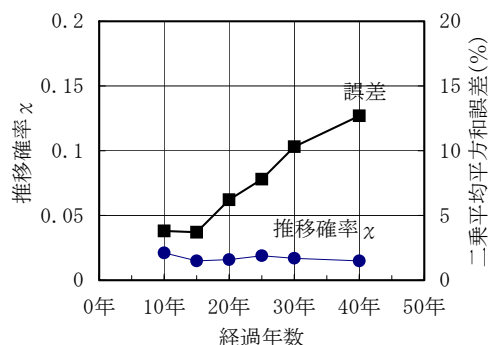


図-15 合流管の経過年数と推移確率 χ の関係

各経過年数の推移確率の平均値 $\chi=0.0017$ を用いた劣化度の予測値と図-1の文献の読み取り値との相関は、図-16のとおりであった。これは、一定年数を経過した時点の調査診断結果だけでも、合流管の劣化が予測できることを示唆している。

例として、重点的に布設後30年とか35年経過した管きよを調査し、その結果から全体の管きよの劣化の度合いを把握することなどに利用できる。

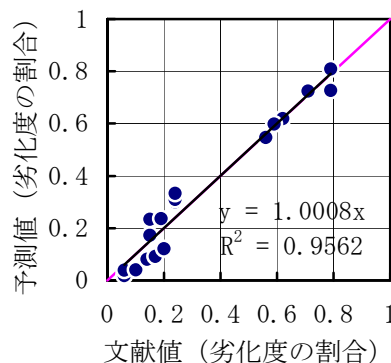


図-16 合流管の文献値と予測値

6. まとめ

テレビカメラ調査の診断結果を用いて污水管きよの劣化進行を予測することや、文献値を用いて合流管きよの劣化進行の予測式を導くことができ、将来の劣化予測ができると考えられた。

管きよの劣化度は、土地造成の経緯、管種、管径、土被り、活荷重、地下水などの埋設条件により異なると考えられるが、推移確率は経過年数によらず一定であった。しかし、団地污水管きよの推移確率は $\chi=0.089$ であったのに対して、合流式管きよは $\chi=0.017$ であり、合流式管きよの方

が、汚水管きょより劣化の進行が遅い結果となった。

推移確率 χ ，単位時間 T を管きょ布設工法や埋設条件で整理し，劣化予測値の精度を上げることが今後の課題である。また，対象となる管きょの口径，土被りなどの条件と推移確率 χ との相関が明らかにできれば，テレビカメラ調査を行わなくてもある程度の劣化予測が可能になると考えられる。

推移確率 χ は，劣化速度を表していると考えられるので，いったん過去の調査データから管きょ布設工法や管種ごとに推移確率 $\chi = f$ （口径，土被りなど）で表せれば，下水道台帳等の情報から将来の劣化が予測できる。また劣化度の高い管きょの布設箇所も把握できることになる。

<参考文献>

- 1) 下水道施設改築・修繕マニュアル（案）1998年版（社）日本下水道協会
- 2) 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 第43回下水道研究発表会講演集
- 3) 舗装路面における劣化予想手法の課題と改善対策 渡部 健矢 室蘭大学工学部卒業研究
- 4) RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発 小牟禮 建一 等 コンクリート工学論文集 第15巻 第1号 2004年1月