

長岡京市における下水道施設の リスク要因と劣化過程に関する研究 —科学的根拠に基づく更新・維持 計画の策定に向けて—

白柳 博章¹・北村 幸定²

¹正会員 奈良県五條土木事務所（〒637-1103 奈良県吉野郡十津川村上野地356番地1）

E-mail: crr_437f@maia.eonet.ne.jp

²正会員 摂南大学理工学部（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8）

E-mail: kitamayu@mbox.kyoto-inet.or.jp

近年、膨大な社会的基盤施設ストックの蓄積とともにその老朽化の進行が危惧されており、快適な市民生活の維持を図るためには、市民へのサービスレベル維持を鑑みつつ、施設の更新や維持管理の費用を最小化していく議論を進めることが重要となっている。しかしながら、小規模な事業者では長期的な視点からどのようなサービスレベルで下水道施設の更新や維持管理を実施していくかについて定量的な評価は遅々として進んでおらず、特に下水道施設の劣化過程に関する科学的検証は緒に就いたところである。

そこで、本研究では、京都府長岡京市における下水道事業について現状を把握した上で、更新・維持計画のモデル化を行うべく、下水道施設の劣化過程のモデル化ならびにライフサイクルコストの算出を行う。そして、事業者における更新・維持計画に関するリスク要因とその対応策について述べることにより、実用的なストックマネジメントに向けての方向性と課題について整理する。

Key Words :Sewerage systems, Social capital infrastructure, Deterioration process
Renewal and maintenance planning, Stock management, Public management

1. 研究の背景と目的

近年、水道・下水道・電気・ガス・道路といった社会的基盤施設ストックの膨大な蓄積とともにその老朽化の進行が危惧されており、それは快適な市民生活を妨げる形で顕在化しつつある。また、社会的情勢をみると、少子高齢化や人口減少により、より一層の財政状況の逼迫が予想される。

それゆえに、快適な市民生活の維持を図るためには、サービスレベル維持を鑑みつつ、事業者として施設の更新や維持管理の費用を最小化していく議論を進めることが、市民への説明責任を果たす上でも重要となってきている。

しかしながら、下水道の事業者については、概ね市町村を単位としており、比較的小規模な所が多い。そのようなところでは、長期的な視点から下水道施設の更新や維持管理をどのように行っていくか、また限られた財源

の中でどのようなサービスレベルを提供できるか、について定量的な検証を前提とした議論が遅々として進んでおらず、短期的な視点にとどまりがちである。それゆえに、短期的・長期的な視点から施設の更新や維持管理に関するスキームを構築し、事業者として施設のストックマネジメントを実践することが必要である。特に、下水道施設の劣化過程に関する科学的検証については緒に就いたところであり、施設の健全性の調査や判定、劣化予測手法の検討や利活用が、ストックマネジメントを実践するためには極めて重要である¹⁾。

そこで、本研究では、京都府長岡京市における下水道事業について現状を把握した上で、下水道施設の劣化過程のモデル化、ならびにライフサイクルコストの算定を行う。そして、更新・維持計画に関するリスク要因について考察し、対応策について提示することにより、科学的根拠に基づく実用的なストックマネジメントに向けての方向性と課題について整理する。

具体的には、第2章にて、長岡京市の下水道施設における概況と、管種ごとの敷設延長についてまとめる。

第3章にて事業体としての更新・維持計画のモデル化を行うにあたっての前提条件を示した後、信頼性工学の考え方に基づいた下水道施設の劣化過程のモデル化、ならびにライフサイクルコストの定式化を行う。

そして、第4章にて、長岡京市の下水道施設における更新・維持計画に関するリスク要因について考察し、事業体としての対応策を提示する。

最後に、本研究のまとめを行うとともに、下水道施設の更新や維持管理に関するストックマネジメントを行う上での諸課題を整理する。

2. 現状把握

(1) 概況

京都府長岡京市は、京都盆地の南西部に位置する面積19.18km²、人口約8万人の都市である²⁾。京都市や大阪市の間に位置し、古くからのベットタウンが広がっているとともに、名神高速道路や国道171号沿いには、工場も数多く立地している。

長岡京市における下水道事業は1974年から開始されており、下水道管渠の総延長は221.2km³⁾ (2012年4月1日現在)、下水道普及率は96.9% (2008年4月1日現在)⁴⁾となっている。

図-1に年度別の整備延長と累計の整備延長を記す。敷設されてから20年(処分制限期間)を超過している管路が約90kmと全体の約4割を占め、さらに30年を超過している管路も約15kmある。

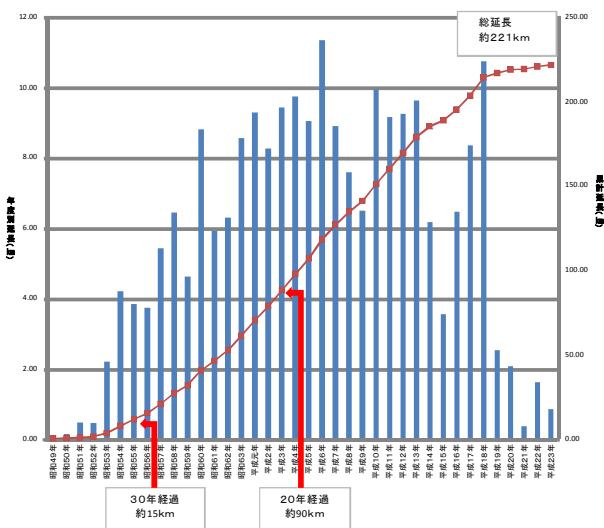


図-1 管路の年度別整備延長

なお、長岡京市から排出される下水の処理は、京都府が管理する流域下水道の処理場にて行っているため、市が管理する施設は管路・マンホールやポンプ場である。また市から府に対して流域下水道分担金を支払っている。

(2) 管種ごとの敷設延長

図-2に管種ごとの敷設延長を示す。陶管 (TP) が最も多く全体の43.1%を占めており、次に硬質塩化ビニール管 (VU)、ヒューム管 (HP) となっている。

主要幹線ではヒューム管 (HP) が主に敷設されており、枝線では陶管 (TP) や硬質塩化ビニール管 (VU) が主に敷設されている。

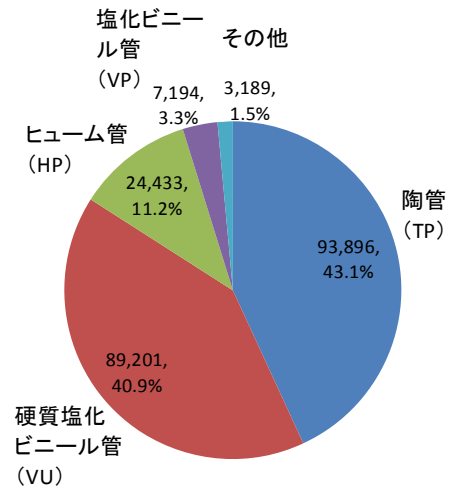


図-2 管種ごとの敷設延長

3. 事業体としての更新・維持計画のモデル化

(1) 前提条件

長岡京市は污水处理施設をもたないため、事業体としてストックマネジメントの対象となる施設は主に管路やマンホールとなる。また、下水道事業が開始されてから37年が経過しており、標準的な耐用年数である50年に到達し、更新を必要とする施設が今後数多く発生する。さらに、下水道普及率がほぼ100%となっていることから、施設に求められるサービスレベルとして、下水道を利用する人々が常時施設を使用できる状態にすることが要求されている。

それゆえに、事業体として管路資産全体を常に健全な形で保有するためには、管路にかかる費用について計画期間内における管路網全体での総額 (以下ではライフサイクルコスト:LCCと記す) を最小にすることが求められている。ここで管路にかかる費用とは、更新費用・管路破損による修繕作業費用・管路破損による被害額・点検調査や清掃等の保守作業費用の合計と定義する。

そして、LCCを最小とするために、管路網のうち、どの管路をどの時期にどのような対応を行っていくかが重要となる。対応方法については、次のケースを想定する。

対応方法0: 修繕のみで更新しない

対応方法1: 旧施設を撤去して長寿命化更新する

対応方法2: 旧施設を撤去して新設更新する

次に、どの管路をどの時期にどのような対応を行っていくか、を定量的に把握するためには、管路の劣化過程について考える必要がある。なぜなら、長期間管路の更新を行わない場合、更新費用は減少するものの、劣化に伴う管路破損の修繕作業費用や被害額が増加することにより、LCCが増加すると考えられるためである。

次節では、管路の劣化過程について、劣化に伴う管路破損の確率が管路の故障確率に等しくなるものとして、信頼性工学の考え方に基づいたモデル化を行う⁵⁾⁶⁾。

(2) 管路の劣化過程のモデル化

時期 τ における管路の故障確率密度関数を $f(\tau)$ とすると、故障確率（時期0から時期 t までの間に故障する確率）は、累積故障分布関数

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad \dots (1)$$

と表される。したがって、時期 t まで故障しない確率は $1 - F(t)$ であり、時期 t まで正常に動作してきた管路が、引き続き時期 $t + dt$ の時間内に故障する条件付き確率は

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} dt \quad \dots (2)$$

と表される。ここで関数

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad \dots (3)$$

は寿命が時期 t だけ続いた後、次の瞬間に故障が生じる率を表しており、これを管路の故障率と呼ぶ

式(1)を(3)に代入し、境界条件 $F(0) = 0$ を用いると、

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t h(\tau) d\tau\right\} \quad \dots (4)$$

と表される。そして時期 t における管路の故障確率密度関数 $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = h(t) \cdot \exp\left\{-\int_0^t h(\tau) d\tau\right\} \quad \dots (5)$$

と表され、一般的には下記で示すようなワイブル分布に近似される。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \\ = at^\beta \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta+1} \cdot t^{\beta+1}\right) \quad \dots (6)$$

$$h(t) = \frac{m}{\eta^m} \cdot t^{m-1} = at^\beta$$

m : 形状パラメータ, η : 尺度パラメータ

これより、布設時期 S_0 (現時期0より以前とする) の管が時期 s に更新される場合の時期 t における故障率 $h(t)$ は、次式で与えられる⁵⁾⁶⁾。

$$h(t) = \alpha(t - S_0)^\beta \quad (S_0 \leq 0 \leq t \leq s) \quad \dots (7)$$

$$h(t) = \alpha'(t - s)^{\beta'} \quad (s < t \leq S)$$

ここで、 S : 計画期間の最終時期, α, β : 更新前の管路の係数, α', β' : 更新後の管路の係数を表す。

更新前の管路 i の係数 α_i, β_i , 対応方法 m にて更新後の管路 i の係数 $\alpha'_{i,m}, \beta'_{i,m}$, 布設時期 S_{0i} を用いて、更新を行わない場合の管路 i の故障確率密度関数 $f_i(t)$ は

$$f_i(t) = \alpha_i(t - S_{0i})^{\beta_i} \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i + 1}(t - S_{0i})^{\beta_i + 1}\right\} \\ (0 \leq t \leq S) \quad \dots (8)$$

時期 s に対応方法 m にて更新される場合の管路 i の故障確率密度関数 $g_{i,s,m}(t)$ は

$$g_{i,s,m}(t) = \alpha_i(t - S_{0i})^{\beta_i} \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i + 1}(t - S_{0i})^{\beta_i + 1}\right\} \\ (0 \leq t \leq s) \quad \dots (9) \\ = \alpha'_{i,m}(t - s)^{\beta'_{i,m}} \exp\left\{-\frac{\alpha'_{i,m}}{\beta'_{i,m} + 1}(s - S_{0i})^{\beta'_{i,m} + 1}\right\} \\ - \frac{\alpha'_{i,m}}{\beta'_{i,m} + 1}(t - s)^{\beta'_{i,m} + 1} \\ (s < t \leq S)$$

管路の故障確率 $F(t)$ は

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i + 1}(t - S_{0i})^{\beta_i + 1}\right\} \quad \dots (10)$$

と表される。

式(8) (9)を横軸に時期、縦軸に故障確率密度関数を図示したものを、図-3に示す。

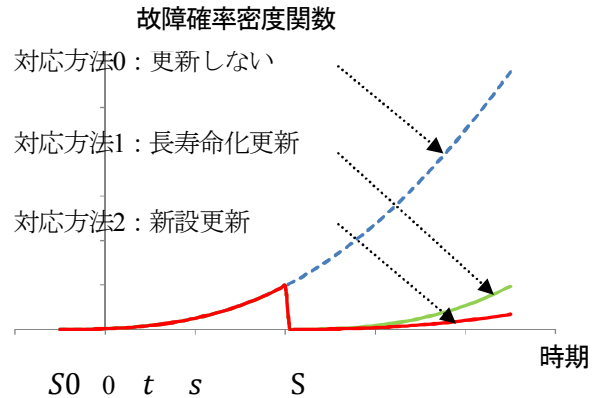


図-3 時期と故障確率密度関数

更新しない場合、故障確率密度関数は時期がたつにつれ増加していくが、更新した場合は更新時期 s において一旦故障確率密度関数が0となり、再び時期がたつにつれ増加していく。

(3) ライフサイクルコストの定式化

管路網を対象として更新を行う際には、LCC が最小となるものとして更新時期や対応方法を決定する。目的関数は、管路にかかる費用について計画期間内における管路網全体での総額 LCC が最小となるものとして、次

式で表す。

$$LCC = \sum_{t=1}^s (TC_{t,1} + TC_{t,2} + TC_{t,3} + TC_{t,4}) \rightarrow \min \dots (11)$$

管路にかかる費用 $TC_{t,1} \sim TC_{t,4}$ について、モデル化したものを以下示す。

a) 更新費用 $TC_{t,1}$

管路網は本本の管路から構成されるものとし、管路 i ($i = 1, 2, \dots, I$)について、計画期間内($0 \sim S$)において計画期間内に更新しない場合を $\lambda_i = 1$ 、する場合を $\lambda_i = 0$ 、また時期 s に対応方法 m ($m = 1, 2$)の更新する場合を $X_{i,s,m} = 1$ 、更新しない場合を $X_{i,s,m} = 0$ とする。

更新費用については、管路の口径や管種、対応方法によって異なり、また更新時期によらないものとする。つまり、管路における対応方法 m での更新費用を $C_{i,m}$ とすると、時期 t における管路網での更新費用 $TC_{t,1}$ は次式のように表される。

$$TC_{t,1} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^2 C_{i,m} X_{i,t,m} \dots (12)$$

b) 管路破損による修繕作業費用 $TC_{t,2}$

管路 i の故障確率密度関数 $A_i(t)$ は、式(8)(9)を用いて以下のように表される。

$$A_i(t) = \lambda_i \cdot f_i(t) + \sum_{s=1}^s \sum_{m=1}^2 X_{i,s,m} \cdot g_{i,s,m}(t) \dots (13)$$

これから、管路 i の時期 t における破損1件あたりの単位修理費を $p_{i,t}$ とすると、時期 t における管路網での管路破損による修繕作業費用 $TC_{t,2}$ は次式のように表されるものとする。

$$TC_{t,2} = \sum_{i=1}^I p_{i,t} \cdot A_i(t) \dots (14)$$

c) 管路破損による被害額 $TC_{t,3}$

管路 i が時期 t に破損した場合、管路 i の上流に位置する利用者が被害を受けるものとする。1件の破損による利用者一人あたりの被害額を q で表すと、時期 t における管路破損による被害額 $TC_{t,3}$ は、管路 i の上流に位置する利用者数 $U_{i,t}$ を用いて次式のように表される。

$$TC_{t,3} = \sum_{i=1}^I q \cdot A_i(t) \cdot U_{i,t} \dots (15)$$

なお、管路 i の上流に位置する利用者数 $U_{i,t}$ は、管路 i に接続して利用している人数 $Pop_{i,t}$ と、管同士の接続関係を表す $\delta_{i,j}$ を用いて、次式で算出する。

$$U_{i,t} = \sum_{j=1}^I Pop_{j,t} \cdot \delta_{i,j} \dots (16)$$

ここで、 $\delta_{i,j}$ は管路 j が管路 i より上流に位置するとき1、それ以外を0とする

d) 点検調査や清掃等の保守作業費用 $TC_{t,4}$

点検調査や清掃等の保守作業費用は、管路破損による修繕作業費用に比例するものとし、時期 t における管路網での保守作業費用 $TC_{t,4}$ を次式で表す。

$$TC_{t,4} = \sum_{i=1}^I k_t \cdot p_{i,t} \cdot A_i(t) \dots (17)$$

4. 更新・維持計画に関するリスク要因と対応策

本章では、長岡京市の下水道施設の現状を踏まえて、更新・維持計画に関するリスク要因を考察した上で、事業者としての対応策を提示する。

長岡京市における下水道事業は1974年から開始され、下水道管渠の総延長は221.2kmと、膨大な施設ストックをかかえている。さらに、施設の老朽化が進むについて、今後の更新・維持計画への投資の増大が見込まれる中で、今後の人口減少・高齢化社会といった利用料金や税収の低迷といった財政状況の逼迫が事業者の経営に甚大な影響を及ぼす恐れがある。また、東南海・南海地震や活断層地震による地震災害や、局地的豪雨による浸水被害等といった自然災害に関するリスクも増大している。

このような状況の中で、下水道施設を維持管理し、市民に対して適切なサービスを提供していくためには、短期的のみならず長期的な視点でもって施設の更新や維持管理に関するスキームを構築し、事業者として施設のストックマネジメントを実践することが重要である。以下に更新・維持計画に関する対応策についてまとめる。

(1) 日常の維持管理に関する視点

日常の維持管理については、費用を抑制しつつも、緊急対応がスムーズに図れ、迅速に復旧できる体制づくりを行う必要がある。具体的には、過去に発生した破損やつまりの履歴データの構築や、破損やつまりの原因や場所を逐一把握することにより、今後の維持管理にあたっての傾向と対策について考えていく。そして、抜本的な改善が必要な個所については更新していくといった対応が必要であると考えられる。

また市民の協力を得ながら破損やつまりの箇所をすぐに特定できるような体制づくりや、破損やつまり時の対処方法のマニュアル化により、迅速に復旧できるような体制づくりの構築が必要であると考えられる。

(2) 施設の更新に関する視点

施設の更新にあたっては、工法の見直しや新工法の採用により、費用や工期の縮減を図る必要がある。具体的には、従来のような開削工法の他に、管だけを更生していく非開削工法を採用することにより、工事による生活や商業活動への影響を最小限にとどめる工夫も必要であると考えられる。

また、管路の重要度や管種・敷設年度を考慮しつつ、更新に関する優先順位を設定すべきである。具体的には、管路の重要度について複数項目該当するか管種が陶管（TP）に該当する箇所を優先すべきである。また工事発注にあたっては、ある程度の延長を同時に行うとともに、新工法や非開削工法を実施することにより、費用や工期の縮減を図り、工事中における生活や商業活動への影響を最小限にとどめるべきである。

(3) 事業者としての視点

以上のような事項についてデータベース化を図り、データの蓄積を逐一行うことにより、長岡京市の下水道施設における劣化度合について把握を行うとともに、工学的な知見を得ることが重要である。また、PDCAサイクルを踏まえた、継続的なストックマネジメント構築を行い、それを実践していくことが不可欠である。

また、今後の人口減少・高齢化社会を見据えながら、サービスレベルの設定や施設の再編を行うとともに、市民への説明責任を果たしつつ、社会性と公平性を鑑みながら、事後対応から事前予防対応へ移行し、安全・安心・快適な社会的基盤施設づくりを目指すべきである。

さらに、事業者のあり方として、維持管理費・建設費や流域下水道分担金については使用料や国庫補助で賄い、起債や起債償還費については市税で賄うような上下分離方式を目指すべきであり、社会的基盤施設における公共経営の枠組みについて再構築していくべきである⁸⁾。

図4に施設の更新や維持管理に関するスキームについて簡単にまとめる。

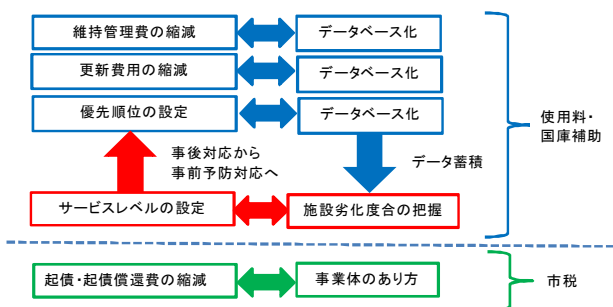


図4 施設の更新や維持管理に関するスキーム

5. まとめと今後の課題

本研究では、下水道施設の適切なストックマネジメントの必要性を認識し、施設管理や維持更新のスキームを提示すべく、京都府長岡京市の事例を挙げて、更新・維持計画のモデル化を行うにあたっての前提条件を示した後、下水道施設の劣化過程のモデル化、ならびにライフサイクルコストの定式化を行った。

モデルを用いて定量的な評価を行う上で課題となるのは、まず管路の故障率を決定する各種パラメータの設定である。これについては、社会的基盤施設の劣化の実態把握について、地域横断的・時系列的なアプローチが必要となってくると考える⁹⁾¹⁰⁾。次に、破損1件あたりの単位修理費・1件の破損による利用者一人あたりの被害額等の原単位の設定である。これについては、長岡京市における事業の実態把握やアンケート調査により、値を推定する必要があると考える¹¹⁾。

説明変数の精査やデータ精度の向上、モデルの改良等といった課題を踏まえ、管路の重要度や管種・敷設年度を考慮した複数のアクションプランを作成した上で、そのLCCや実現可能性を比較・検討し、最適な更新・維持戦略の策定を行いたい。

最後に、下水道管の破損は、埋設される道路の交通や安全に影響を及ぼすとともに、流下機能に支障が生じると地域環境の悪化や市民の日常生活の利便性が損なわれることが危惧される。それゆえ、下水道のシステムを長期間維持しつづけるための科学的根拠に基づく実用的なストックマネジメントモデルの提示を行うことは、地域の方々への説明責任を果たす一つの契機になると考える。また、アセットマネジメントの国際標準であるISO5500Xの制定の準備が進む中、ストックマネジメント導入・標準化の機運となるような取り組みを進めていきたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、長岡京市上下水道課の皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 貝戸清之・鎌田敏郎・大谷明・山中明彦：下水道コンクリート管渠のストックマネジメント，下水道協会誌 Vol.47 No.577, pp.78-86,2010.11
- 2) 長岡京市 HP, <http://www.city.nagaokakyo.kyoto.jp/>
- 3) 長岡京市:長岡京市下水道総合監理システム
- 4) 長岡京市:京都府桂川右岸流域関連長岡京市公共下水道事業計画
- 5) 新体系土木工学 2 確率・統計解析 第4章 確率過程, 土木学会編
- 6) 森正幸・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・沼田篤男：水道管路の超長期的な更新投資の経済性評価に関する研究，水道協会雑誌，第79巻第7号（第910号），2010.07

- 7) 森正幸・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・荒井康裕・沼田篤男：水道管路更新事業の合理的計画方法に関する研究，水道協会雑誌，第80巻第7号（第922号），2011.07
- 8) 宮坂典男・岩田雄三：社会資本における NPM 型マネジメントシステムの構築に関する研究，季刊 政策・経営研究，2008 vol4
- 9) 国土交通省国土総合研究所下水道研究部下水道研究室：下水道管渠におけるストックマネジメント導入に関する検討調査，国土交通省国土総合研究所平成 22 年度年報
- 10) 小島延連・中根進：ローテーション管理データを用いた管きよの物理的耐用年数の推定，2010 年度下水道研究発表会 II-5-1-7
- 11) (社)日本下水道協会：下水道事業における費用効果分析マニュアル(案)，2006.11
- 12) 白柳博章・北村幸定：下水道施設の最適更新・維持計画の策定指針に関する基礎的研究，—社会的基盤施設における公共経営マネジメントシステムの構築とその運用に向けて—，第43回土木計画学研究発表会（春大会），2011.05

(受付)

A study on the risk factor and the deteriorative process of the sewerage systems in Nagaokakyo City - For constructing and operating the renewal and maintenance planning on the scientific base -

Hiroaki SHIRAYANAGI and Yukisada KITAMURA

In recent days, with the accumulation of the enormous social capital infrastructure, these decrepit stocks are brought to a crisis progressively. It is important that we advance an aregumment to minimize the expense of update and maintenance of the infrastructure with a comfortable civic life. However, in the small enterprise, the quantitative verification is still lack and difficult how to plan and perform the update and the maintenance of the sewerage systems from the long-term viewpoint with present service level. Particularly, the scientific inspection about the deteriorative process of the sewerage systems just began.

In this study, we have grasped the the present conditions of sewer business in Nagaokakyo City (Kyoto Prefecture). For modeling quantitatively about the update and maintenance planning of the infrastructure, we construct the modeling of the deterioration process of the sewer institution, and calculate lifecycle costs about maintaining the sewerage systems. Lastly, by describing the risk factors and the countermeasures of them about the update and maintenance planning in Nagaokakyo City, we show the flame of optimum renewal and maintenance planning from the short-term and long-term viewpoint and arrange the various problems about the stock management to perform this scheme.