

下水道管路の調査サイクルがライフサイクルに与える影響*

Analyzing the Effect of Inspection Strategy on Lifecycle of Sewage Pipes*

青木 一也**・木村 一夫***・伊藤 淳一****

By Kazuya AOKI**・Kazuo KIMURA***・Jyunichi ITO****

1. はじめに

我が国の下水道施設は、これまでの整備の進展に伴い、管路延長は約40万km、処理場数は約2,000箇所等（平成18年度現在）といった膨大なストックが蓄積されるまでに至った¹⁾。現在、それらの膨大なストックに及ぶ施設の老朽化の問題が顕在化しており、管路の老朽化に起因する道路陥没事故の発生件数も増加傾向にある。一方、人口減少や少子高齢化社会の到来等の背景のなか、下水道の料金収入の減少等による下水道事業の厳しい財政事情に与える影響が懸念される。これらのことから、下水道施設の安全性の確保、市民への充分なサービスの提供と下水道施設のライフサイクル費用の最小化を目指した効率的な事業運営が求められている。

下水道施設は時間の経過とともに劣化が生じ、その結果、施設の信頼性が徐々に失われる。しかしながら、例えば下水道管路は地中に埋設されており、その劣化の状況を日常パトロール等の目視検査等で容易に確認することが難しい。下水道管路の安全性を維持するためには、TVカメラ等を用いた定期的な調査を実施する必要がある。調査の実施により、下水道管路の損傷箇所と損傷形態、緊急度等を判定し、損傷に応じた適切な処置（修繕や更新）を施すことにより、下水道管路の信頼性を確保する。しかし、下水道管路の調査には多くの費用を必要とする。下水道管路の修繕・更新の必要性は調査の実施によって判断が可能であり、調査を実施し修繕・更新により信頼性を保つといった正の効用のみならず、調査コスト増の負の効用を含めることで、コストと信頼性のトレードオフの関係が示される。合理的な下水道管路の維持管理業務の実現のために、合理的な調査サイクルの設定を無視することはできない。

このような問題意識のもと、本研究では、下水道管路のアセットマネジメント問題に着目し、下水道管路の

調査サイクルがライフサイクル費用や管路の信頼性に与える影響を分析し、合理的な調査サイクルの設定方法を提案する。まず、過年度に実施された調査の履歴データや修繕履歴データを用いて、統計的手法により下水道管路の劣化予測モデルを構築する。その際、膨大な延長に及ぶ下水道管路の劣化過程の不確実性を評価するために、下水道管路一本単位の調査データを用いてスパン別の劣化速度の異質性を評価する。また、同一管路に対する複数の損傷形態の評価結果を用いて、スパン単位の総合評価を行い、修繕の必要性を判断する方法を提案する。さらには、管一本単位及びスパン単位の劣化予測モデルを用いて、下水道管路の劣化/調査/修繕・更新過程モデルを定式化し、調査サイクルの変化によって、将来時点における下水道管路の寿命長と信頼度、ライフサイクル費用に与える影響を分析することにより、所与のサービスレベルを満足するための合理的な調査サイクルの設定方法を提案する。以下、2. では、本研究の基本的な考え方を整理し、3. において、下水道管路の劣化/調査/修繕・更新過程のモデル化について述べる。最後に、4. の適用事例にて、具体的事例を通じて、本研究で提案したモデルを用いた分析結果を考察する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

劣化を伴う施設に対する最適点検戦略に関する研究は、オペレーションズ・リサーチの分野にて多くの研究が報告されている²⁾⁵⁾。これらの研究は、信頼性工学で取り扱っている機械等のような寿命長が比較的短い施設を対象として、その劣化確率を定式化し、修理や置き換え等を考慮した最適点検政策を導出する方法を提案している。また、点検のタイミングを、点検によって施設の交換に関係なく決定された時刻にて点検を実施する履歴非依存型点検方策や、点検時に獲得される部材の状態に応じて点検のタイミングを決定する履歴依存型点検方策の設定方法を論じている。

一方、水道、下水道施設を対象とした合理的なマネジメント方法に関する研究についても、昨今、多くの研究が蓄積されている⁶⁾⁹⁾。細井らは、中山間地の自治体

* キーワーズ：維持管理計画，アセットマネジメント

** 正員 博（工）株式会社パスコ研究開発センター
（東京都目黒区東山2-8-11, TEL 03-3715-4011）

*** 株式会社パスコ コンサルタント事業部

**** 修（工）株式会社パスコ コンサルタント事業部

を対象として点在する水道施設の目視による巡回点検の最適経路を探索する方法を提案している⁷⁾。堀らは、下水道処理施設のコンクリート版の劣化過程を予測し、期待ライフサイクル費用を最小化するための最適点検・補修モデルを提案している⁸⁾。

慈道らは、劣化水準が不確実に変動する土木施設の最適点検・修繕タイミングを決定する方法を提案している¹⁰⁾。ここでは、ある時点における修繕等のアクションにより決定された劣化水準に基づいて、次に点検を実施するタイミングとその時点におけるアクションの内容を決定するような状況依存的ルールを定式化している。また筆者らは、高速道路に設置された付帯施設を対象として、施設の劣化確率を推計するとともに、定常政策としての点検頻度が、施設のライフサイクル費用と劣化リスクに与える影響について分析した結果を報告している^{11) 12)}。

本研究で対象としている下水道管路は、その寿命長が数十年に及ぶ長スパンであること、さらに、管路の損傷形態が多数に及び、それらの損傷を統合したスパン全体の評価から修繕・更新アクションの必要性の有無を判断するまでの過程のモデル化が極めて複雑であることを特徴として挙げることができる。調査サイクルの変化による下水道管路のライフサイクルへの影響を分析するためには、下水道管路の損傷の発生過程を把握する必要がある。本研究では、まず、管路一本単位の調査及び修繕データをもとに、損傷形態別に劣化の進行過程を評価するハザードモデルを推計する。また、損傷形態別のハザード率を用いて、スパン全体の健全度ランクを予測する。そのうえで、これらの劣化予測モデルを用いて将来時点における下水道管路の修繕・更新需要を予測し、調査サイクルを変化させることで、管路の寿命長やライフサイクル費用に与える影響を定量的に分析する。下水道管路の調査サイクルを、スパンの劣化速度の違いに応じて定期的に設定するような、状況非依存型定常調査サイクルを設定する。次に、下水道管路の残寿命長に対して調査サイクルを変化させるような、状況非依存型非定常調査サイクルにて調査スケジュールを変化させることにより、その調査サイクルの違いによるライフサイクルに与える影響を分析する。なお、土木施設の調査サイクルを検討する場合、調査によって獲得された施設の状態に関する情報をもとに、次の調査サイクルを設定するような状況依存型戦略の有効性を検証することが重要となる。状況依存型と状況非依存型では、それぞれ異なる長を有しており、対象施設の維持管理方法等に応じて使い分ける必要がある。状況依存型調査サイクルでは、施設の損傷状況や修繕・更新アクション等に応じて調査サイクルを逐次変更することができるため、過剰な調査によるコスト増を防止することが期待できる。しかしながら、本研

究で取り扱う下水道管路の場合、調査の対象となる構造物が多数存在し、さらには、複数の損傷形態を同時に取り扱う必要がある。状況依存型による調査サイクルによるコスト削減効果の有効性が確保できない可能性について注意する必要がある。状況依存型による最適調査サイクルの設定方法については、今後の課題としたい。

本研究では、調査及び修繕履歴データを用いて、下水道管路の劣化予測モデルを推計する。土木施設の劣化予測モデルについては、既に、劣化ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を導出するための手法論に関する一連の研究が体系的に整理されている^{13) 14)}。本研究における下水道管路の劣化予測モデルの推計には、これらの研究にて提案されている手法論を用いることとする。

一方、下水道管路のライフサイクル評価を行うための、劣化/調査/修繕・更新過程における影響分析は、下水道管路の複数に及ぶ損傷形態や下水道管路の総合評価方法¹⁵⁾の多様性等により解析的に解くことが難しい。本研究では、下水道管路一本単位の劣化確率等のインプット条件に基づいて、モンテカルロ・シミュレーションにより劣化/調査/修繕・更新過程を予測する方法を用いることとする。

(2) 下水道管路の維持管理の課題

下水道管路の維持管理においては、前述したように、地中に埋設されている管路の損傷状態を把握するためにTVカメラ等を用いた調査を定期的実施する必要がある。TVカメラ調査では、一度の調査で複数の損傷箇所と損傷レベルを発見する。管路の寿命長に大きな影響を及ぼす代表的な損傷形態として、浸入水、管の継手ズレ、管の破損、管のクラック、上下方向たるみ、管の腐食といった6種類の損傷が調査項目として設定されており¹⁷⁾、さらにはそれらの評価単位が損傷による影響度の度合いによって、管路一本単位とスパン単位に分類されている。管路の修繕は管路一本単位の損傷箇所について実施するのに対して、更新及び更生はスパン単位に実施される。このような調査データと評価方法、修繕・更新の実施単位の違い等の複雑な状況に適したマネジメントの意思決定に有用な情報を導出する方法を確立することが課題である。

また、下水道管路の寿命長の定義に関する考え方が確立されていないことも、下水道管路のアセットマネジメントを検討するうえで無視することはできない。法定耐用年数では50年と定義されているが、法定耐用年数は工学的な劣化診断による実際の寿命長を表現しているものではない。一般的に、事後的修繕から予防的修繕にシフトすることによって間接的に管路の寿命長を延ばすことが可能であるとされる。また、物理的に長寿命が期待できる新材料の導入、新工法の適用等の効果を、費用便

益分析等により検討することで、直接的な長寿命化が期待できる可能性がある。しかしながら、いずれにしても、現段階において下水道管路の寿命長を確定的に予測することが不可能である。また管路の劣化過程には多様な不確実性を含んでおり、その結果、管路の寿命長にもばらつきが生じることとなる。

下水道管路のアセットマネジメントを検討する場面では、現状考えられるそれらの課題を踏まえるとともに、継続的な実施と事後評価により、パフォーマンスを評価していくための全体システムの構築が必要である。

3. 劣化/調査/修繕・更新過程のモデル化

(1) 下水道管路の劣化予測モデル

下水道管路は目視調査やTVカメラ調査等により劣化度が判定され、その調査データは時系列に蓄積されている。調査の判定基準は、管の腐食やたるみ、破損等、複数の項目が設定され、管路内に異常が発見された箇所についてその損傷程度を3ランクにて評価する。これらの調査データを用いた統計的手法による管路の劣化予測モデルを推計する場合、劣化した管路に関する情報のほか、調査時に損傷がなかった管路に関する情報が必要となる。膨大な延長に及ぶ下水道管路の損傷個々の調査データから得られるサンプル数は極めて少なく、調査データを用いた集計的な手法による平均的な劣化速度の算出が難しい。そこで本研究では管路の劣化過程の不確実性を考慮した確率論的劣化予測モデルにより損傷個々の劣化確率（ハザード率）を算出する。

離散的な健全度で表現される下水道管路の劣化状態を、指数ハザードモデルを用いたマルコフ推移確率により表現することができる¹⁵⁾。指数ハザード関数を用いて、検査時刻 τ_A と $\tau_B = \tau_A + z$ の間で健全度が i から $j (> i)$ に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z)$ は、

$$\begin{aligned} \pi_{ij}(z) &= \text{Prob}[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] \\ &= \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで、健全度 i のハザード率を、混合指数ハザード関数

$$\tilde{\lambda}_i^{l_k} = \lambda_i^{l_k} \varepsilon^k \quad (2)$$

を用いて表すことで、劣化速度の異質性を評価することができる。異質性パラメータ ε^k は、標準ハザード率 $\lambda_i^{l_k}$ からの乖離の程度を表すガンマ分布に従う確率変数であ

る。異質性パラメータ ε^k の値が大きい箇所ほど劣化速度が相対的に速いことを表す。

下水道管路の損傷形態は複数の種類に及ぶため、それらの損傷形態別にハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ を推計する。このとき、劣化速度の異質性を評価する ε^k の設定のためのグルーピングをスパン単位で設定する。スパン単位の劣化速度の違いを評価し、その劣化速度の違いと下水道管路の属性との関連性について評価する。なお、ハザード率の推計方法の詳細については参考文献¹⁵⁾¹⁶⁾を参照してほしい。

(2) 下水道管路の調査スケジュールのモデル化

下水道管路の調査スケジュールを分析するために、管路の劣化と調査によって獲得された情報をもとに修繕・更新を適用する一連の過程をモデル化する。前述したように下水道管路の損傷形態や修繕・更新の判定は複数の指標により定義されるが、ここでは単純に下水道管路の1スパンを対象として、その損傷状態が離散的な K 個の健全度で記述されると仮定する。スパンの健全度を $i (i = 1, \dots, K)$ で表現する。スパンの健全度が最も劣化した状態である K が調査によって観測された時点において更新され、当該スパンの健全度が最良の状態である1に回復する。ここで、スパンの劣化過程が2回の調査間隔の間をマルコフ過程によって推移するものとした場合、時刻 t に実施された調査で観測されたスパンの健全度を $h(t) = i$ と表現したとき、次の調査時に観測される健全度 $h(t+1) = j$ の生起確率（条件付確率）は、

$$\text{Prob}[h(t+1) = j | h(t) = i] = \pi_{ij} \quad (3)$$

として表すことができる。すべての健全度の組み合わせに対して、この推移確率 π_{ij} を定義すると、

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{KK} \end{pmatrix} \quad (4)$$

のようにマルコフ推移確率行列として表現することができる。状態 K は、更新されない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり、常に $\pi_{KK} = 1$ が成立する。また、マルコフ推移確率は過去の劣化過程とは無関係に定義される。

ここで、あるカレンダー時刻である t におけるスパンの健全度を考える。 t 期の健全度が $i (i < K)$ であるとき、時刻 t から s が経過した時刻 $t+s$ でのスパンの健全度分布ベクトルを、 $p_i(t+s | h(t) = i) (l = 1, \dots, K-1)$ により表現する。このとき、時刻 t で観測されたスパンの健全度が i であるという条件下において、次の調査時

$t + 1$ に健全度 K が観測されずに供用が継続される確率を,

$$P_{\tau_i}(t + 1|h(t) = i) = \sum_{l=i}^{K-1} p_l(t|h(t) = i)(1 - \pi_{lK}) \quad (5)$$

として表現する. 一方, 次の調査時 $t + 1$ に健全度 K が観測され, スパンが更新される確率は,

$$\tilde{P}_{\tau_i}(t + 1|h(t) = i) = \sum_{l=i}^{K-1} p_l(t|h(t) = i)\pi_{lK} \quad (6)$$

として表現する.

一方, 式(5)によって更新されないスパンに対しては健全度ランクに応じた修繕が適用される. 修繕政策 d の健全度 j に対する修繕コストを c_j^d とすれば, 調査時における修繕費用の期待値は,

$$e_i^d = \sum_{j=i+1}^{K-1} \pi_{ij} \cdot c_j^d \quad (7)$$

によって算出することができる.

時刻 $t = 0$ を下水道管路の供用開始時とし, $t = T (> 0)$ を寿命長 (最大供用時間) とする. その間に, 下水道管路の調査を $n (n = 1, 2, \dots)$ 回実施するものとして, その調査時刻を (t_1, t_2, \dots, t_n) と表記する. 調査の時間間隔を,

$$t_k - t_{k-1} = \tau_k \quad (8)$$

として定式化する. このとき, 区間 $(0, T]$ でのスパンの調査, 修繕, 更新にかかる総費用 C_n は,

$$\begin{aligned} C_n(\tau_1, \dots, \tau_n; T) = & I \sum_{t=1}^n [P_{u^t}(\tau_1, \dots, \tau_n) + P_{u^{t-1}, r^t}(\tau_1, \dots, \tau_n)] \\ & + R \sum_{t=1}^n P_{u^{t-1}, r^t} + \sum_{t=1}^n P_{u^t}(\tau_1, \dots, \tau_n) e_i^d \quad (9) \\ & + \sum_{t=1}^n C_{n-t}(\tau_{t+1}, \dots, \tau_n; T - \sum_{l=1}^t \tau_l) P_{u^{t-1}, r^t} \end{aligned}$$

の再帰方程式として定式化することができる. ここで, P_{u^t} , P_{u^{t-1}, r^t} は, それぞれ, 時刻 t まで更新されない確率, 時刻 $t - 1$ まで更新されず時刻 t にて健全度 K が観測されスパンの管路が更新される確率を表現しており,

式(5), (6)により算出する. また, I , R は, スパンの調査費用, 更新費用を表している. 調査間隔を拡げることによってその間に観測されない健全度 K の発生確率が増加する. 下水道管路のリスク管理水準を, 健全度 K の発生確率として定義することで, 所与のリスク水準を満足する条件下において,

$$C_n(\tau_1^*, \dots, \tau_n^*; T) = \min_{\tau_1, \dots, \tau_n} C_n(\tau_1, \dots, \tau_n; T) \quad (10)$$

を満足するような調査スケジュールの組み合わせを導出することができる.

調査間隔を一定に設定することで, 状況非依存型定常調査戦略を, また調査間隔をランダムに設定することにより, 状況非依存型非定常調査戦略を, 式(10)を用いて表現することができる.

4. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案した方法論を, 武蔵野市が管理する下水道管路へ適用した. 武蔵野市の下水道は, 昭和20年代後半より整備が進み, その管渠延長は3つの処理区をあわせ, 約250kmに及んでいる. 下水道管路の管理台帳や過去に実施された調査, 修繕に関する情報がデータベース化されており, それらの情報を統合し, 管路の劣化予測モデルを推計するとともに, 調査サイクルによる影響分析を試みた.

(2) 下水道管路の劣化予測モデル推計結果

劣化予測モデルの推計結果を表-1 に示す. 表の上段に損傷別の標準ハザード率を, 中段に混合指数ハザードパラメータの推計結果を示している. さらに同表下段に推計に用いたサンプル数と, そのうち劣化が確認されたサンプル数を併記している. 「浸入水」「管の腐食」については劣化サンプル数が極めて少ないため, 混合ハザードモデルの推計対象から除外した. 異質性パラメータの評価は各スパン単位とし (スパン数 599), スパン別の劣化速度の違いを評価した. 「管の破損」にて, ガンマ関数のパラメータ ϕ の推計結果が最も小さい値を示しており ($\phi = 2.26$), スパン間での劣化速度のばらつきが最も大きい. 次に, 下水道管の特性と劣化速度の関係を分析した. 図-1, 図-2 に, 「管のクラック」について異質性パラメータと土被り, 管径との関係を図示している. 横軸に示した異質性パラメータが大きいほど, $\varepsilon = 1.0$ をベンチマーキングとして当該スパンの劣化速度が相対的に速いことを示している. 劣化速度が速いスパン

表-1 下水道管路の損傷別劣化予測モデルの推計結果

損傷	浸入水	管の継手ズレ	管の破損	管のクラック	上下方向のたるみ	管の腐食
なし	7.79E-5	4.53E-4	5.48E-4	7.81E-4	6.83E-4	3.07E-4
λ_i	c	2.86E-2	4.32E-2	7.79E-2	9.40E-2	2.69E-4
	b	-	6.06E-2	0.102	4.66E-2	-
	ϕ	-	4.48	2.26	4.80	25.64
ε_{min}	-	0.566	0.379	0.495	0.879	-
ε_{max}	-	2.496	3.724	1.878	1.495	-
総サンプル数	10,980	10,960	10,975	10,975	10,961	11,051
劣化サンプル数	24	145	173	254	211	95

注)「浸入水」,「上下方向たるみ」,「管の腐食」は,健全度ランク a が観測されていないため,健全度 b に対するハザード率が推計されない。 ϕ はガンマ関数の分散パラメータであり, ϕ の値が大きいほど異質性パラメータ ε の分散が小さい。 ε_{min} と ε_{max} は,異質性パラメータ ε の最小,最大値を表している。サンプル数は,補修又は敷設から点検までの期間,同一管について複数回調査した場合の調査期間を 1 サンプルと計上しており,総サンプル数と管理延長は一致しない。

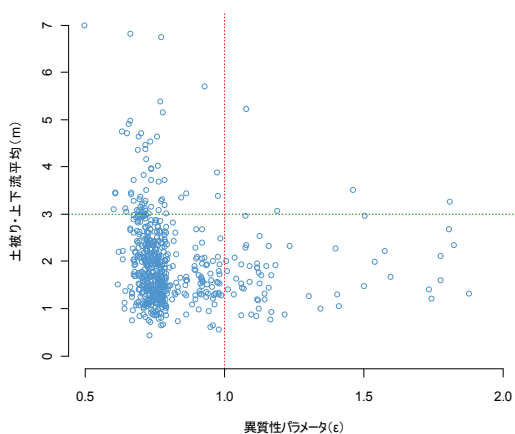


図-1 土被りと ε の関係 (管のクラック)

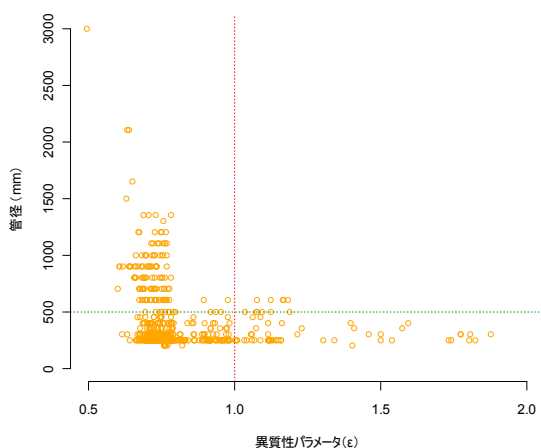


図-2 管径と ε の関係 (管のクラック)

ンが,土被り 3m 未満,管径 500m 未満に数多く分布している。

損傷別に推計したハザード率を用いて,修繕の緊急度ランクの推移をモンテカルロ・シミュレーションによって算出した結果を図-3に示している。同図に示した結果は,推計に用いた全599スパンを対象としており,ベンチマークケース (BMケース) と称す。建設時から30年経過した時点で約40%がランクB以下となり,50年後にはランクAが20%近くまで増加することがわかる。

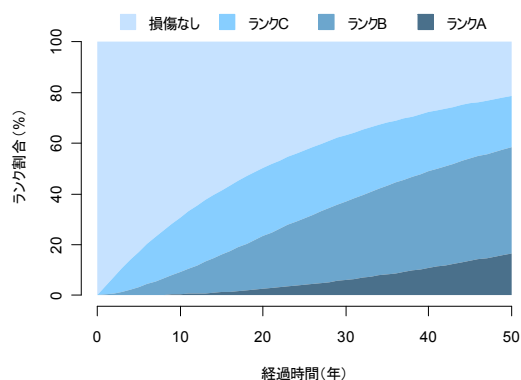


図-3 総合評価 (損傷ランク) の推移: BM ケース

(3) 調査サイクルとライフサイクル費用の関係

次に,下水道管路の調査サイクルとライフサイクル費用及び劣化リスクの関係を分析した。図-4に,調査間隔を1年から20年の1年間隔で変化させ,その際の下水道管路のスパン別の年平均費用をライフサイクル費用として算出した。同時に,スパンの管路が更新されるまでの期間において調査がない時刻または更新の直前のランクAが観測される確率を劣化リスクとして算出した。修繕戦略として,戦略①:修繕なし,戦略②:ランクCで修繕,戦略③:ランクBで修繕,戦略④:ランクC及びBで修繕,の4ケースを設定した。なお,ランクAが観測された場合は直ちに更新する。本図に示したLCC-劣化リスク曲線は,調査間隔を一定とした状況非依存型定常調査戦略である。いずれの修繕戦略を採用した場合でも,LCCと劣化リスクのトレードオフの関係が示されている。しかしながら,修繕戦略④の場合,劣化確率が0.01以上(調査間隔6年以上)では,劣化確率の増加率に比較してLCCの削減の幅が小さい。調査間隔がある一定の間隔を超えた段階で,調査間隔を拡げることによるコスト削減が期待されず,一方で劣化確率が急激に増加する恐れがあることを明確に示している。修繕戦略による違いを比較すると,いずれのリスク管理水準 (劣化確率) を所

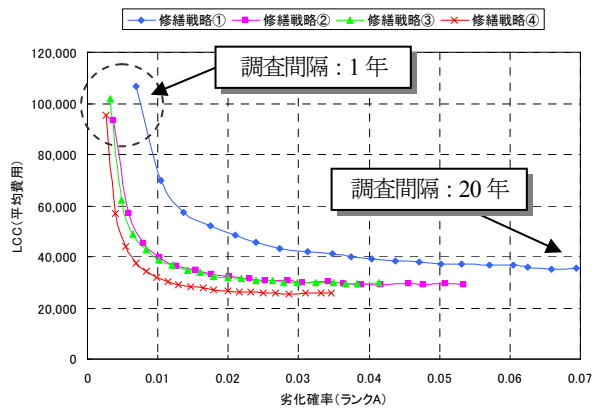


図4 補修戦略別 LCC-劣化リスク曲線

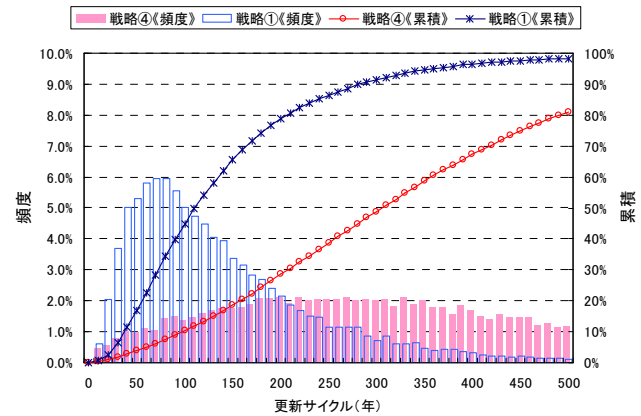


図5 修繕戦略別更新サイクルの頻度分布 (調査間隔 10 年のケース)

与とした場合にLCCが最小となるのは、修繕戦略④を採用した場合となる。

図-5には、修繕戦略①と修繕戦略④における寿命長（ランクAで更新するまでの時間）の頻度分布を示している。修繕を実施しない戦略①では、寿命長が50年から60年付近に集中している。一方、修繕戦略④において予防的修繕を実施した場合に、寿命長が大きく長寿命化の方向へシフトしているのが理解できる。なお、本分析では、最大供用時間長 T を無限大に設定している。

5. おわりに

本研究では、下水道施設のアセットマネジメントに焦点をあて、下水道管路の調査サイクルがライフサイクル費用や寿命長等に与える影響を分析するための方法論を構築するとともに、適用事例にて実際の管理データを用いた実証分析を試みた。具体的には、下水道管路一本単位の損傷別の劣化予測モデルを推計し、さらに調査スケジュールの最適化問題を定式化するとともに、劣化ハザード率を用いて将来の修繕・更新需要を予測し、ライフサイクル評価をモンテカルロ・シミュレーションにより実行した。なお、本稿に示した以外の分析結果、状況非依存型非定常調査戦略等については、講演時に報告させていただきたい。

<謝辞>

研究の遂行において武蔵野市都市整備部下水道課のご支援を賜っている。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道事業重点施策，2009。
- 2) Kodo Ito, Toshio Nakagawa : An Optimal Inspection Policy for a Storage System with Three Types of Hazard Rate Functions, *Journal of the Operations Research Society of Japan* 38(4), pp.

423-431, 1995.

- 3) 牧野倫子，田中泰明：疲労損傷に対するコスト基準での履歴非依存型点検方策の最適スケジュール，*日本応用数理学会論文誌* 8(4), pp.497-508, 1998.
- 4) 田村信幸，森雅夫：寿命の幾何的減衰を伴うマルコフ的劣化システムに対する点検政策，*日本経営工学会論文誌* 51(6), pp.574-586, 2001.
- 5) 田村信幸，修理と取り替えを考慮したマルコフ的劣化モデルに対する最適点検政策，*電子情報通信学会技術研究報告 R, 信頼性* 103(275), pp.17-22, 2003.
- 6) Hosoi, Y.: Consideration on optimal water leakage inspection in interval for areas with mixture of different leakage outbreak rates, *International conference on optimal operation of water distribution system and leakage management technology*, 2005.
- 7) 細井由彦，増田貴則，Dagnachew AKLOG，小林啓太：点検頻度が異なる水道施設が分散して存在する事業体における維持管理作業の効率化，*土木学会論文集G, Vol.62, No.4*, pp. 369-376, 2006.
- 8) 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水処理施設の最適点検・補修モデル，*土木計画学・研究論文集，土木学会，Vol.25, No.1*, pp.213-224, 2008.
- 9) 藤生和也，宮内千里：統計的手法による下水道管渠の耐用年数確率分布推定及び将来改築必要量予測，*土木学会建設マネジメント研究論文集, Vol.14*, pp.65-72, 2007.
- 10) 慈道充，小林潔司：不確実性下における最適点検・修繕ルール，*土木学会論文集, No.744/IV-61*, pp.39-50, 2003.
- 11) 青木一也，山本浩司，小林潔司：トンネル照明システムの最適点検・更新政策，*土木学会論文集, No.805/VI-69*, pp.105-116, 2005.
- 12) 青木一也，山本浩司，小林潔司：時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル，*土木学会論文集F, Vol. 62, No. 2*, pp.240-257, 2006.
- 13) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，*土木学会論文集, No.801/I-73*, pp.69-82, 2005.
- 14) 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，*土木学会論文集A, Vol.64, No.4*, pp.857-874, 2008.
- 15) 日本下水道協会：下水管きよの改築等の工法選定手引き（案），平成14年5月。