

硫酸腐食を考慮した下水道施設の 点検・補修シミュレーション

大成建設株式会社 堀 優裕^{*1}日本下水道事業団 松井 宏樹^{*2}大阪大学大学院 貝戸 清之^{*3}京都大学経営管理大学院 小林 潔司^{*4}

By Michihiro Hori, Hiroki MATSUI, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

下水道施設の劣化・損傷の中でも、硫酸腐食は一旦劣化が進行すると、大規模補修が必要となるだけでなく、施設の重大事故につながるリスクを有する。したがって、硫酸腐食環境下の下水道施設に対しては、ライフサイクルコストおよびリスクの低減が可能な予防保全政策を立案することが喫緊の課題であり、政策決定のための実践的な方法論の開発が求められている。そこで、本研究では、はじめに硫酸腐食の進行速度の時間依存性を非齊次型マルコフ連鎖モデルで記述し、つぎにシミュレーションによってライフサイクルコストとリスクの総和として定義されるトータルコストの最小化を実現する点検・補修政策の決定法を提案する。さらに、提案手法の実務への適用性・有効性を検証するために、シミュレーションモデルのプロトタイプを作成し、実証分析を実施した。その結果、本研究で提案する方法論によって導出される最適点検・補修政策は、過去の実務実績と比較して整合性が高いこと、予防保全型の点検・補修政策の立案に有用な情報を与え得ることを示唆した。

【キーワード】下水道施設、硫酸腐食、アセットマネジメント、点検・補修政策

1. はじめに

下水道施設のアセットマネジメントにおいては、点検・補修に要するライフサイクルコストと、万一の損傷発生時に想定される様々なリスクを同時に、かつ効率的に低減させる方法論の構築が重要な課題となっている。そこでは、ライフサイクルコストと、費用換算されたリスクの総和によって定義されるトータルコストが判断指標として採用されることが多い。その上で、適切な劣化予測モデルと連動した形で、トータルコストの最小化を実現する最適な点検・補修政策が決定される。

下水道施設では、劣化メカニズムが解明されていない劣化・損傷が少なくない。特に、嫌気性環境下では、微生物の生物化学的反応により、硫酸が生成される。この硫酸に起因する硫酸系腐食は、一般的

に劣化進行速度が早く、一度劣化が進行した後は、大規模な補修が必要になり、さらに重大事故につながるリスクを有する。したがって、硫酸系腐食の予防保全に対する実務的要請は極めて大きい。

硫酸腐食環境下にある土木構造物の最適点検・補修政策を検討する際には、硫酸腐食の進行速度の時間依存性に留意する必要がある。硫酸腐食による劣化の進行速度は、その対策としてコンクリート構造物に施されるライニングの設置時点からの経過時間に依存する。したがって、その劣化過程を表現するためには、状態間の推移確率の経時的变化を記述できる非齊次型マルコフ過程を前提としたモデル化が必要である。また、下水道土木構造物においては、目視を含めた点検データの取得・蓄積が困難であり、当該分野の専門技術者が有する主観的な知見を積極的に活用していくことが重要となる。さら

*1 原子力本部原燃サイクル部, 03-5381-5315, hori@ce.taisei.co.jp

*2 事業統括部新プロジェクト推進課, 03-6361-7832, Hiroki-Matsui@jswa.go.jp

*3 工学研究科フロンティア研究センター 特任講師, 06-6879-7598, kaito@g.a.eng.osaka-u.ac.jp

*4 経営管理講座 教授, 075-383-3222, kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

に、最適点検・補修政策の実務への円滑な適用を図るために、実務者にとって受け入れやすい、簡易で実践的な方法論を構築することが求められる。

以上のような問題意識の下、本研究では、硫酸腐食環境下にある土木構造物の最適点検・補修政策を立案するための実践的な方法論を提案するとともに、硫酸腐食環境下にある最初沈殿池を対象とした実証分析を実施し、提案手法の適用性・有用性を実証的に検証する。具体的には、硫酸腐食速度の時間依存性を非齊次型マルコフ過程でモデル化するとともに、ライフサイクルコスト（あるいは、リスクとの総和であるトータルコスト）を最小化する点検・補修政策を時系列シミュレーションにより求める。方法論の構築にあたっては、特に、1) 当該分野の専門技術者が有する先駆的・主観的知見の有効活用、2) 既存の指針類との整合性、3) 実務への適用性、に配慮した。以下、2. では、本研究の基本的な考え方を述べる。3. では、本研究で提案する方法論の概要を説明するとともに、最初沈殿池を例とした具体的な入力データの作成方法を示す。4. では、実証分析について述べる。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

近年、土木施設の劣化予測およびライフサイクルコスト評価に関する研究が急速に進展しつつある。例えば、津田らは、橋梁部材を例にあげ、その劣化過程を記述するマルコフ推移確率を多段階指數ハザードモデルを用いて定式化し、目視点検データを用いて推計する方法論を提案している¹⁾。一方、堀らは、下水道施設では目視点検データの取得そのものが困難であるという現状を踏まえ、補修別工事数量等といった集計的データからマルコフ推移確率を推計する方法を提案している²⁾。これらは、一般的の土木構造物に広く適用可能であるが、状態間の遷移確率が時間とともに変化しないという齊次性の仮定の下で成立する手法である。しかし、後述するように、コンクリート構造物の硫酸系腐食については、遷移確率の時間依存性を考慮したモデル化が不可欠であり、非齊次マルコフ過程を導入する必要がある。損傷・劣化確率の時間依存性を考慮したモデルに

関しては、劣化状態が故障の有無という2値状態で表されるような施設や機器を対象とした、青木らのワイブル劣化ハザードモデル³⁾がある。さらに、青木らは、ワイブル劣化ハザードモデルを多段階の健全度で評価される土木施設へ適用するために、多段階ワイブル劣化ハザードモデルにより非齊次型のマルコフ推移確率を定式化し、詳細な実証分析を行っている⁴⁾。これらは、劣化に影響を及ぼす特性変数をパラメータとしてハザード関数に組入れができる等、多くの優れた利点を有するモデルであるが、適用に際して、統計的手法という性質上、実際の点検データの蓄積量が推計精度に直結する。後に詳述するように、下水道施設では、点検そのものが困難であり、硫酸腐食に関する点検データの蓄積が乏しいのが現状である。したがって、実務的な観点からは、当該分野に携わる専門技術者が有する知見等を有効活用しつつ、比較的簡便に適用できる方法論を早期に開発することが求められる。

(2) 硫酸腐食の時間依存性

下水道施設のコンクリート構造物では、化学的要因による劣化機構が未解明な劣化事象が少なくない。議論を整理するために、化学的劣化現象を非硫酸系腐食と硫酸系腐食に大別する。非硫酸系腐食は、遊離炭酸や弱酸の存在により、中性化の進行が促進されたものとみなすことができる。したがって、非硫酸系因子による劣化過程を記述するマルコフ連鎖モデルとしては、状態間の推移確率が時間に依存しない齊次型マルコフ連鎖モデル^{1, 2)}を適用することができる。一方、嫌気性環境下において、微生物の生物化学的反応により生成される硫酸に起因する硫酸系腐食は劣化進行が速い。したがって、近年ではその対策として、ライニングによる防食被覆層を設けることが通例となっている。防食被覆層を有するコンクリート構造物の硫酸腐食は、ライニングが健全なときには緩慢に進行するが、一旦背面のコンクリートに硫酸が到達した後は、急激かつ加速度的に腐食が進行するという特徴がある。このように、硫酸系の腐食は、ライニング設置時点を起点とする時間依存性を有するために、齊次型マルコフ過程で劣化過程をモデル化することは困難である。そこで本研究では、硫酸腐食速度の時間依存性を考慮するた

めに非齊次型マルコフ過程による確率論的劣化予測モデルを導入し、これに基づいて最適点検・補修政策に関して分析する。

なお、下水道のコンクリート構造物の硫酸腐食は、下水中あるいは汚泥中の硫酸イオンに起因する硫酸塩還元細菌と硫黄酸化細菌の代謝に伴う生物化学的侵食である。下水道施設のコンクリートの硫酸腐食については、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル（日本下水道事業団編著）」（以下、「防食指針」）⁵⁾に詳述されている。読者の便宜のため、同指針の見解を中心に、硫酸腐食の過程をとりまとめる。

1. 嫌気性状態の下水中および汚泥中で、硫酸塩還元細菌による硫酸塩 (SO_4^{2-}) から硫化物 (H_2S , HS , S^{2-}) が生成される（生物学的作用）。
2. 液相から気相へ H_2S （硫化水素）ガスが放散される（物理学的作用）。
3. 密閉されたコンクリート構造物気相部内面の結露水中で、好気性の硫黄酸化細菌等による硫化水素から硫酸が生成される（生物学的作用・化学的作用）。
4. 硫酸とコンクリートの成分との反応によってコンクリートの劣化が進行する（化学的作用・物理的作用）。

このように、硫酸腐食の進行は、水温、下水中の硫酸イオン濃度や施設の構造等、コンクリート部材がおかれた個別の条件に大きく左右され、気相部の H_2S ガス濃度、湿度、気温、換気条件等の腐食環境により、コンクリートの腐食速度が大幅に異なる。コンクリートの硫酸腐食現象については、材料劣化の観点からも各種の研究が鋭意実施されているが、その複雑性ゆえに、筆者らの知る限り実用的な劣化予測方法は開発されていない。

(3) 先駆的・主観的データの有効活用

下水処理施設は、各種施設が直列・並列に配置された複数のサブ施設で構成される複合的施設である。通常、下水処理施設は年中無休で24時間稼動しており、槽内には常に処理水が存在する。また臭気の拡散を防ぐために覆蓋を有する施設も多い。このため、コンクリート構造物の点検の実施に際しては、

槽内の処理水の排水が必要となり、当該構造物を含むサブ施設全体の稼動停止を余儀なくされる。しかしながら、現実には、処理施設のリダンダンシーが確保されていない場合も少なくない。このような事情から、下水道施設のコンクリート構造物の劣化過程に関する情報（点検データ・補修履歴データ等）は、これまでほとんど蓄積されておらず、また、今後においても劣化過程に関する情報を獲得することは、必ずしも容易ではない。このような事情により、実際の点検データに基づくワイブル劣化ハザードモデル^{3, 4)}の適用は、現段階では困難である。

一方、硫酸腐食環境下にある下水道土木構造物については、「防食指針」⁵⁾により防食対策（防食被覆工）の工法規格が定められ、標準化・規格化が進んでいる。したがって、類似の腐食環境下におかれた防食被覆層の劣化傾向（例えば、初期不良が発生する割合や発生期間）については、専門技術者の間で、ある程度共通の見解が存在する。そこで、本研究では、硫酸腐食対策の緊急性に鑑み、下水道の維持管理に携わる専門技術者に対するヒヤリング等で得られた先駆的・主観的データを有効活用した劣化予測モデルの構築を試みる。なお、これらの定性的データは、今後の知見の蓄積に従い、逐次更新していくべきものであることは言うまでもない。さらに、方法論の構築にあたっては、実務への適用を見据えなければならない。特に、既存の指針類と整合的であることが求められると同時に、実務担当者にとって適用・説明が容易な手法であることが望ましい。したがって、本研究では、ハザードモデルを用いたマルコフ連鎖モデルによる統計的劣化予測手法¹⁾⁻⁴⁾の推計精度の高さを認識しつつも、実務者の理解がより容易な時系列シミュレーション手法による方法論を提案する。さらに、シミュレーションモデルの構築にあたって必要となる各種要素のモデル化を「防食指針」⁵⁾に則って行うこととする。

3. 最適点検・補修政策の決定手法

(1) 方法論の概要

本研究で提案するシミュレーション手法およびシステム・プロトタイプは、堀らが様々な構造物の点検・補修戦略の検討に用いている方法論⁶⁾に基づき、

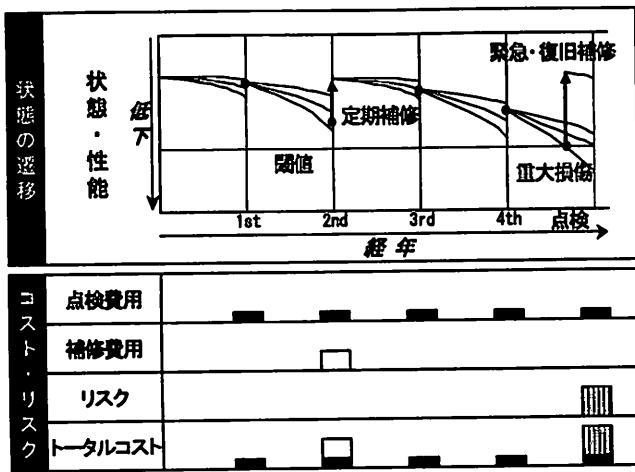


図-1 シミュレーションの基本的な考え方

下水道施設が有する特殊性を加味して再構築したものである。以下では、まず本研究で用いた手法の基礎となる方法論の概要を簡潔に述べ（詳細については参考文献⁶⁾を参照されたい）、下水道施設の特殊性を考慮したモデル化手法について説明する。

構造物の状態遷移は、図-1に示すように、「時間の進行に伴い、ばらつきをもって劣化が進展し、定期点検のたびに状態が確認され、また補修によってその状態が改善される」といった一連のプロセスで表現することができる。本方法論は、はじめに、マルコフ過程をベースに、構造物の劣化の進展や点検・補修政策を数理モデルで表現し、構造物の将来の状態推移をシミュレートする。さらに、その過程で発生するリスクを含めたトータルコストを算出する。これらの一連の解析を、点検・補修政策の代替案ごとに実施し、トータルコストの最小化を実現する政策を最適点検・補修政策として採用する。モデル化の概要を図-2に示す。

本方法論は時系列的なシミュレーションを基本としたものであり、構造物の劣化過程や点検・補修政策の組合せを変えることにより、実際に行われている管理の実態に即した点検・補修政策代替案の比較評価を、柔軟かつ簡便に実施することができる。また、健全度分布、ライフサイクルコスト・リスク等についての時系列情報に基づいて、代替案の比較評価も実施可能であり、実務者の理解が容易なものとなっている。なお、本研究ではトータルコストを、図-3に示すように、点検・補修等に要するコストと費用換算されたリスク（年間期待損失）との総和に

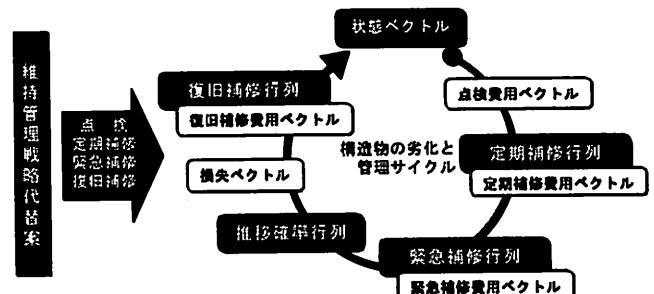


図-2 行列・ベクトルを用いたモデル化の例

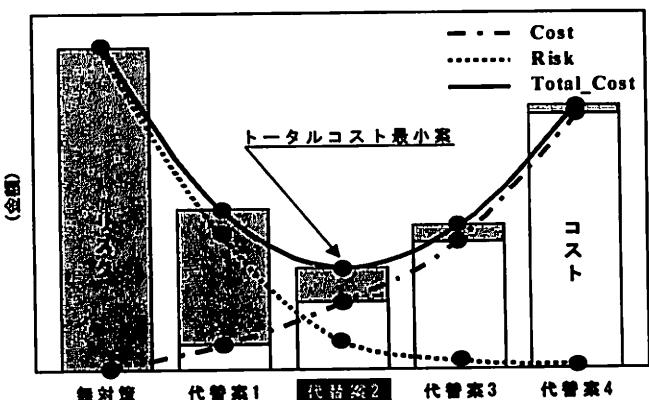


図-3 トータルコストの概念図

より定義する。同図から明らかなように、コストとリスクはトレードオフの関係にある。トータルコストを指標とした代替案比較を行うことにより、コストとリスクとのトレードオフ関係を考慮した最適点検・補修政策の選択が可能となる。

(2) 対象構造物のモデル化

本手法では、構造物を構成する部材をエレメントに分割し、同一の劣化特性・環境特性を有するエレメントをまとめたエレメントグループを設定して、エレメントグループ毎にシミュレーションを実施する。エレメントのグループ化に際しては、部材種別・劣化特性・環境特性の他、補修の単位（まとめて補修される部材の単位）、あるいは情報管理の単位（健全度等を観測・記録する部材の単位）とエレメントとを適切に対応づけることが重要である。なお、4.では硫酸腐食を受ける代表的な施設の1つである覆蓋を有する最初沈殿池を対象とした実証分析を実施する。したがって、以下でも最初沈殿池を対象とし、その特殊性を考慮した具体的なエレメントグループの設定を例示する。

- 最初沈殿池の部材は、一般に頂版・底版・側壁に分割され、側壁はさらに気相部・気液境界部・液相部に分割される。これらの部位は、異なった劣化特性を持ち、補修単価等も異なるため、個別のエレメントとして取り扱う。
- 一方、下水処理施設は、頻繁に繰り返し補修することができない、樹脂ライニングによる補修が中心である、等といった特殊性を有しており、構造物横断方向（下水流下直角方向）に分割された補修単位ではなく、大きな部材単位で一括補修されるのが基本である。したがって、横断方向のエレメント分割は行わない。
- エレメントの大分割を行った場合、1部材の中に劣化傾向が異なる部位が存在することになる（例えば、下水流入側と流出側など）。本試算では、各エレメントの状態を、エレメント内の劣化傾向の差異によるばらつきも考慮して、当該エレメントの総面積に占める健全度ランク毎の面積率（相対頻度）を用いた集計的な状態ベクトルで記述する。
- 同一エレメント内で腐食環境が著しく異なる部位については、必要に応じて特殊部として別エレメントグループを設定する。

以上の考え方に基づき、本試算では、5つのエレメントグループ；1) 頂版：S, 2) 側壁（気液境界部）：W2, 3) 側壁（気相部）：W3, 4) 底版：B, 5) 側壁（液相部）：W1を設定する。

一方で、下水道施設のコンクリート構造物の点検・補修の実施のためには、槽内の処理水を一時排水して、ドライアップすることが必要になる。このために、同一構造物の異なるエレメントグループが同時に補修される場合も多い（例えば、初期沈殿池の側壁の気液境界部：W2と気相部：W3）。このような補修の実情を反映させるために、同時期に一括補修される工事単位としてプロジェクトグループを定義し、プロジェクトの評価単位として用いる。試算にあたっては、1) $P_j : B \& W1$ （底版B、側壁（液相部）W1を一括補修するプロジェクト）、2) $P_j : S \& W2 \& W3$ （頂版S、側壁（気液境界部）W2、側壁（気相部）W3を一括補修するプロジェクト）を定義し、代替案の比較に用いる。

表-1 健全度ランクの定義

健全度ランク	劣化過程の定義	期間を決定する要因
R0：防食被覆層の劣化期間（被覆層がある場合）	防食被覆層が劣化により、はがれ、脱落するまでの期間	防食被覆層とコンクリートとの一体化及び硫酸浸入速度
R1：潜伏期	コンクリートの外観上の変状が見られない期間	コンクリート中への硫酸浸入速度
R2：進展期	コンクリートの変質が鋼材位置までに達する期間	コンクリート中への硫酸浸入速度
R3：加速期	鉄筋腐食が進行する期間	鉄筋の腐食速度
R4：劣化期	コンクリートの断面欠損・鉄筋の断面減少などにより耐荷性の低下が顕著な期間	鉄筋の腐食速度

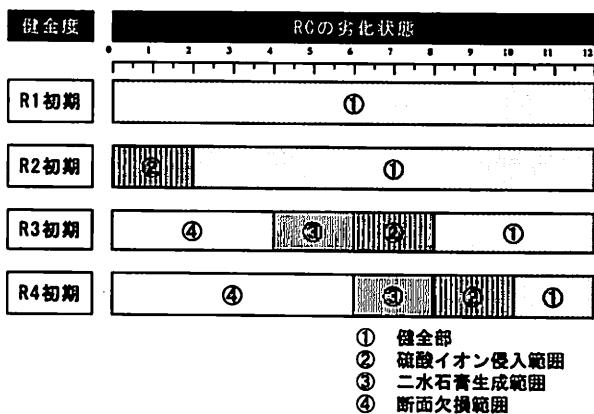


図-4 健全度ランク毎の劣化状態のモデル化

(3) 健全度ランクの定義

本手法では、各エレメントの状態を、離散的な健全度ランク毎の面積率を用いた集計的な状態ベクトルで記述する。劣化の進展に伴う状態ベクトルの推移状態を確率論的劣化予測モデル（マルコフ連鎖モデル）で記述する。また、補修コスト・リスク等も、健全度ランクに基づいて算出される。健全度ランクの定義は、対応する構造物の状態を明確に記述したものでなければならない。加えて、実際の維持管理で用いられる点検・補修マニュアルとの整合性が求められる。本研究では、下水処理施設の維持管理の基本となるべき「防食指針」⁵⁾および「コンクリート標準示方書 維持管理編」⁷⁾との整合性を考慮して、表-1に示す健全度ランクを設定した。なお以下では、同表に示された通常の健全度ランクから逸脱して、予期せぬ損傷が発生した状態を記述するための付加的な健全度ランクDを定義し、R0～R4にDを加えた計6ランクで健全度を評価する。

つぎに、硫酸腐食の進行状況とマルコフ連鎖モデルで記述される健全度の推移とを対応付けるために

は、各健全度ランクにおける物理的な劣化状態をモデル化することが必要である。また、補修数量および補修単価も腐食深さ等に応じて異なるため、補修コストを算定するためにも各健全度ランク毎の劣化状態のモデル化が必要である。本試算では、鉄筋の純かぶりが平均6cm程度のコンクリート断面を仮定し、(1)健全部、(2)硫酸イオン侵入範囲、(3)二水石膏生成範囲、(4)断面欠損範囲の関係が、各健全度ランクの初期時点において図-4に示すような状態にある場合を想定して、各健全度ランクにおける平均的な劣化状態のモデル化を行った。

(4) 補修のモデル化

a) 補修種別の設定

一般に、補修は、1) 定期補修、2) 緊急補修、3) 復旧補修に大別できる。定期補修は「定期点検結果に基づき、計画的・定期的に実施される補修」を、緊急補修は「日常点検や通報等で、ある状態が観測された場合に、マニュアルの規定等に基づき、定期補修を待たずに直ちに実施される補修」を意味する。復旧補修は「損傷モード発生時に、現状復旧のために行う補修」を指す。本研究では、下水道施設の特殊性を考慮し、以下のように補修種別を設定する。

1. 上記3種類の補修種別のうち、「定期補修」と「復旧補修」のみを考慮する。下水道施設においては、日常的な巡回や一般的な施設利用者からの通報等によって施設の劣化を知ることは不可能であるために、「緊急補修」は設定しない。
2. ライニングの寿命や定期点検の困難さを考慮して、比較的長期間の定期補修周期（実証分析では、5年、10年、15年、20年の4パターン）を設定し、定期点検が実施される期においてのみ定期補修の機会があると考える。
3. 損傷モードが施設の運転に直接影響を及ぼす場合（Dランク生起時）、施設機能を早期に回復させるための復旧補修を行う。早期に施設機能を回復させるための緊急工事が必要となるので、補修費用は割高となる。

b) 工法規格の設定

本研究では「防食指針」に則った補修工法および工法規格を設定する。「防食指針」では、対象施設毎

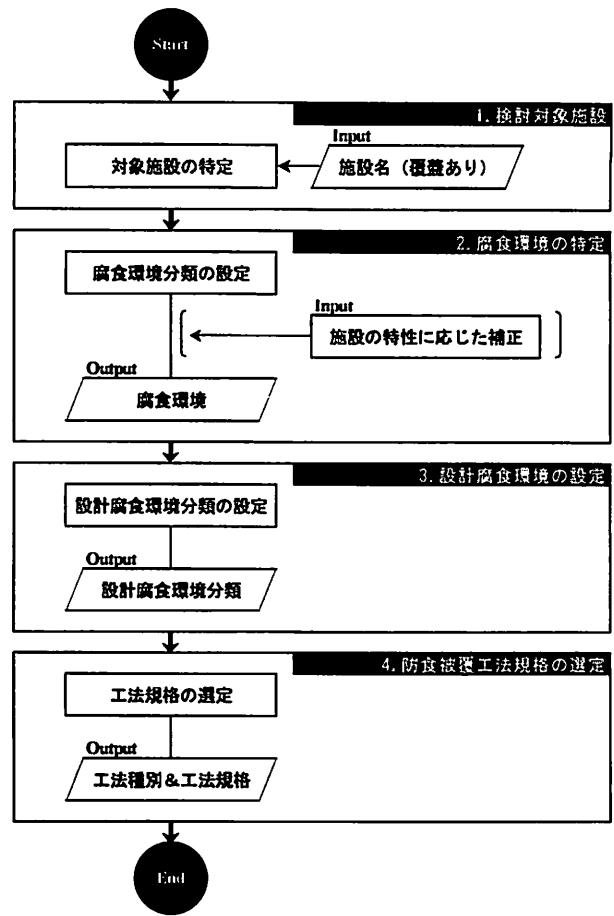


図-5 防食設計フロー

の標準的な腐食環境分類および設計腐食環境分類が定義されており、図-5に示す防食設計フローに従い、設計腐食環境毎に標準的な工法規格が設定される。「防食指針」に基づく腐食環境分類と工法規格の対応関係を整理すると、表-2に示すとおりである。

4. で対象とする硫酸腐食環境下の覆蓋つき最初沈殿池は、設計腐食環境分類でⅡ₂に分類され、塗布型ライニング工法D1かシートライニング工法D2のいずれかが標準的な工法規格として適用される。以下では、補修工法として一般的に採用される塗布型ライニング工法D1を対象とした設定値を示す。

c) 補修コストの設定

工法規格の工種内訳は、劣化部除去工・鉄筋処理工・断面修復工・ライニング工で構成される。前節で設定した健全度ランク毎の劣化状態に基づき、各工種内訳について、各健全度ランクにおける平均的な定期補修単価を表-3のように設定した。設計腐食環境分類はⅡ₂、工法規格はD1、防食被覆材料はビニルエステルを想定している。補修単価の算定にあたっては、各健全度ランクの初期と終期の劣化状態

表-2 設計腐食環境分類と工法規格

腐食環境分類	点検・補修・改築時の難易	般軽腐食環境分類	工法規格	
			塗布型ライニング工法	シートライニング工法
I	1	I ₁	D1	D2
I	2	I ₂	—	D2
II	1	II ₁	C	—
II	2	II ₂	D1	D2
III	1	III ₁	B	—
III	2	III ₂	C	—
IV	—	IV	A	—

(注) 腐食環境は、硫化水素ガス濃度等に基づき、I～IVの4段階に分類される（最も厳しい腐食環境がI）。点検・改築・補修時の難易は、それぞれ1が容易、2が困難であることを示す。これら2つの要素を考慮して、設計腐食環境分類が設定される。一方、工法規格はA種からD種までに分類され、種別毎に詳細な仕様要求性能（例えば耐酸性等）が定められている（D種が最も耐酸性能が高い）。設計対象構造物の設計腐食環境分類が設定されると、上の対応関係に基づき工法規格が決定される。

に対する補修単価を工事実績に基づき積算し、その平均値を当該ランクの補修単価として採用した。

復旧補修は、損傷モード発生時に現状復旧のために行う緊急的な補修であり、そのコストは定期補修等に比べて割高となる。緊急復旧のための補修コストの増分は現地の作業条件によって大きく異なるが、本試算では、工事実績に基づく補修費用の割増率を考慮して、復旧補修コストをランクR4における定期補修コストの2倍程度と仮定して試算を行う。

d) 補修効果の設定

塗布型ライニング工法D1は、劣化部を除去し、必要な鉄筋処理工および断面修復工を実施した後、新たにライニングを施工するものである。したがって、補修直後の状態は、建設当初の健全な状態と同等まで健全度が回復するものとして扱う。また補修後の再劣化も、同様の理由により、建設当初と同等の速度で進行するものと仮定して試算を行う。

(5) 劣化進行のモデル化

a) ライニングの推移確率の設定

ライニングの劣化損傷は、1)初期不良（ピンホール等）に起因する供用後比較的早期に生じる劣化損傷（以下、信頼性工学の用語を用いて初期故障と記す）、2)偶発的な原因により供用期間中にランダムに生じる劣化損傷（以下、偶発故障）、3)ライニングの寿命に起因する劣化損傷（以下、摩耗故障）、等のパターンに大別できる。本研究では、初期故障

表-3 定期補修単価の設定(単位：円／m²)

健全度	劣化部除去工	鉄筋処理工	断面修復工	防食被覆工	計
側壁部					
R0	0	0	0	18,100	18,100
R1	0	0	0	18,100	18,100
R2	9,200	14,700	34,900	18,100	76,900
R3	18,400	44,400	88,650	18,100	169,550
R4	18,400	59,400	126,350	18,100	222,250
頂版部					
R0	0	0	0	23,530	23,530
R1	0	0	0	23,530	23,530
R2	11,950	14,700	38,550	23,530	88,730
R3	23,900	44,400	100,050	23,530	191,880
R4	23,900	59,400	145,950	23,530	252,780
底版部					
R0	0	0	0	16,290	16,290
R1	0	0	0	16,290	16,290
R2	8,250	14,700	24,650	16,290	63,890
R3	16,500	44,400	66,800	16,290	143,990
R4	16,500	59,400	101,800	16,290	193,990

期、偶発故障期、摩耗故障期を有するライニングの劣化・損傷確率の時間依存性を表現するために、ワイルドハザードモデルに基づく非齊次型マルコフ過程を採用する。実際に、硫酸腐食には、ライニングの最弱部に硫酸腐食が生じると、周辺の背面コンクリートの硫酸腐食が進展し、ライニングの防食機能が急激に失われるというメカニズムがある。このようなメカニズムからも、複数部品の耐力の最小値の極限分布として求められたワイルド分布は、実現象のモデル化に適した性質を持つものと考える。

劣化データが蓄積されている場合には、劣化データを用いて非齊次型マルコフ過程（ワイルドハザードモデル）を統計的に推計することが可能である⁴⁾。しかし、先述のとおり、現時点では下水道土木構造物に関する劣化データの蓄積は充分ではなく、ライニングの劣化を支配するパラメータを既存の劣化データから統計的に推定することは困難である。そこで、本研究ではこのような状況と硫酸腐食対策の緊急性を踏まえて、現時点で利用可能な専門家の先駆的な知見という定性的なデータを有効活用してワイルド劣化ハザードモデルを表-4のように設定した。具体的には、通常は劣化データを用いてワイルド劣化ハザードモデルを推計し、劣化確率を算出するという過程に対して、最終的なアウトプットである劣化確率を専門家が以下のように主観的に与えることでワイルド劣化ハザードモデルを逆算する過程を採用した。

- 初期故障は、全体の5%程度に生じる可能性があり、供用から3年間で初期故障の95%が

表-4 ワイブル型ハザードのパラメータ

故障パターン	α	β	γ	損傷率
初期故障	0.50	0.30	0.00	0.05
偶発故障	1.00	10.00	0.00	0.10
摩耗故障	5.00	7.00	7.00	9.85
合計	-	-	-	1.00

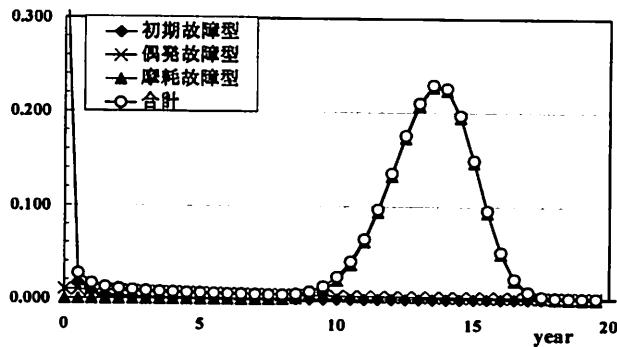


図-6 ワイブル型の故障確率（合成PDF）

発現する。

- 偶発故障は、全体の10%程度に生じる可能性がある。
- 摩耗故障は、供用後7年以内では生じず、また10年以内の発現率は1.5%程度、15年以内の発現率は85%程度である。
- 摩耗故障期が始まる前の供用後7年次までの間に発現する全ての故障の割合は、全体の10%程度、供用後20年次までの間に発現する全ての故障の割合は、全体の99%である。

上記の条件で得られた連続型ワイブル分布を損傷パターン毎の割合で重み付けして合成した複数の確率密度関数(PDF)のうち、専門家の合意が得られたものを図-6に示す。同図は、初期故障が供用後早期に発現した後、偶発故障期に入って安定し、その後経年10年程度から摩耗故障の発現が急増し、経年17~18年でライニングの大部分がその効果を失うという非線形の劣化過程を表している。マルコフ推移確率の設定にあたっては、はじめに、上記の連続型の確率分布を離散化し、年間ハザード率入(任意時点 t で、ある健全状態であったエレメントが時点 $t + \Delta$ において異なる健全状態に推移する条件付き確率密度)を求めた。つぎに、年間ハザード率からマルコフ推移確率を算出し、これによりR0ランクの非遷移確率(R0からR0ランクへの推移確率、ライニング部が健全な状態に留まる確率)を算定した。

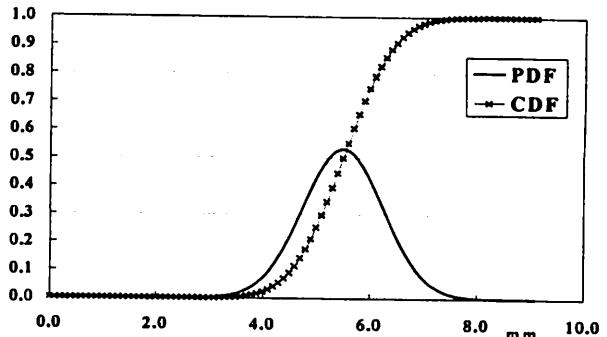


図-7 年間腐食量の確率分布(S · W2 · W3)

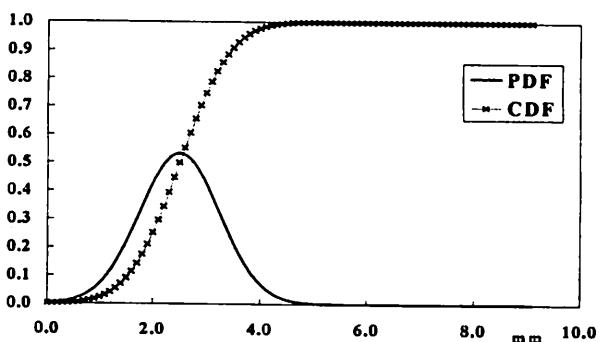


図-8 年間腐食量の確率分布(B · W1)

b) RC部の推移確率の設定

ライニング背面の鉄筋コンクリート部材(以下、RC部)の劣化に関しては、「防食指針」に記載された年間腐食速度の代表値に基づき、最初沈殿池における頂版S・側壁W2(気液境界部)・側壁W3(気相部)の腐食速度をII類程度(4mm/年以上~7mm/年未満)、底版B・側壁W1(液相部)の腐食速度をIII類程度(1mm/年以上~4mm/年未満)と仮定し、この区間に約95%(2σ, 95.45%信頼区間)が含まれる正規分布を定義して腐食速度の分布を設定した。

- 頂版S・側壁W2(気液境界部)・側壁W3(気相部): $\sim N(\mu, \sigma) = N(5.5, 0.75)$
- 底版B・側壁W1(液相部): $\sim N(\mu, \sigma) = N(2.5, 0.75)$

具体的な年間腐食量の確率分布を、それぞれ図-7と図-8に示す。一方、健全度ランク毎の腐食量は、健全度ランク毎の劣化状態のモデル化に従い、表-5のように設定した。なお、同表は、3.(3)に示した条件「純かぶり6cmのRC部材を対象」、および表-1と図-4に基づいて設定した。実証分析においては、以上の腐食速度と健全度ランク毎の腐食量の関係に

表-5 健全度ランク毎の腐食量

健全度ランク	腐食量dの範囲(mm)
R0	—
R1	$d \leq 0$
R2	$0 < d \leq 60$
R3	$60 < d \leq 80$
R4	$80 < d$

	R0	R1	R2	R3	R4	D
R0	$p(t)$	$1 - p(t)$	0	0	0	0
R1	0	0.135	0.865	0	0	0
R2	0	0	0.777	0.223	0	0
R3	0	0	0	0.864	0.136	0
R4	0	0	0	0	0.990	0.010
D	0	0	0	0	0	1

図-9 推移確率行列の例（床版部S）

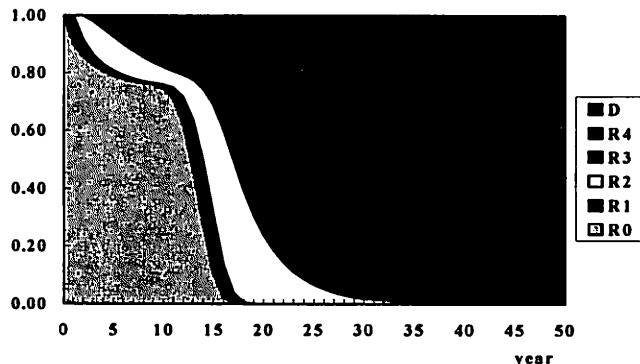


図-10 状態遷移図の例（床版部 S）

基づき、特定の時点（ここでは経年15年次）における状態ベクトルを算出し、RC部の推移確率行列を逆算した。

d) 非齊次性を考慮した推移確率行列の設定

硫酸腐食の非齊次性を考慮した推移確率行列の例として、頂版部Sの推移確率行列を図-9に、状態遷移図を図-10に示す。図-9中の

(t)

が、時間とともに変化するライニング部の非遷移確率を表している。同図は、ライニング劣化の非線形性により、供用初期に初期故障による劣化が一部で進み、その後偶発故障による安定期を迎えた後、コンクリートの急速な劣化期に移行する過程を表現している。

(6) リスク算定条件の設定

本研究では、下水道管理に携わる専門技術者に対するヒヤリング結果に基づき、下水処理施設で考慮すべき一般的なリスク計測項目を整理するとともに、各状態ランクにおける損傷発生確率、損傷発生時の条件付き損失期待値を設定した。最初沈殿池において考慮すべき代表的なリスク計測項目を表-6に

表-6 下水処理施設で考慮すべきリスク計測項目（例）

分類	想定される例
事業主損失 物的損失 人的損失	・損傷発生時の復旧補修費用。 ・床版の抜け、タラップ・梯子の抜け落ち等による、点検従事者の負傷・死亡。
利用者損失	・施設の機能停止に伴い下水道利用者が被る負の便益。 ・ローカル第三者（近隣利用者）が被る環境損失、あるいは対策・補償費用。

表-7 健全度ランク毎の損傷発生確率

健全度ランク	1年あたりの損傷発生確率
R0	0.00
R1	0.00
R2	0.00
R3	0.00
R4	0.01

表-8 損傷発生時の条件付期待損失

健全度ランク	期待損失(千円)
S1：頂版	5,000
B：底版	500
W1：側壁(液相部)	1,000
W2：側壁(気液境界部)	1,000
W3：側壁(気相部)	1,000

示す。また、本試算で用いた各健全度ランクにおける損傷発生確率を表-7に、部位毎の損傷発生時の条件付き損失期待値を表-8に示す。各健全度ランクの単位状態量あたりの年間リスクは、健全度毎の損傷発生確率と部位毎の損傷発生時の条件付損失期待値の積として算定される。なお、表-7から読み取れるように、本研究ではランクR0～R3の損失期待値が0となるように設定した。これは対象事例である最初沈殿池では、施設機能の停止や人的被害の発生等につながる重大な損傷のみをリスク計測の対象として想定しているためである。ただし、本研究では人の立ち入らない処理槽内での損傷を対象としているために、橋梁等とは異なり、コンクリート小片の剥落等がリスクとしては実務上問題にならないことに起因する。また、実際に重大損傷がR0～R3（健全～加速期）の状態から1年内に生起することは通常考えられないために、重大損傷はR4（劣化期）を経由して発生すると考え、R0～R3の損傷発生確率を0と設定した。

4. 實証分析

(1) 適用事例の概要

3.で述べた方法論を用いて、シミュレーションを実施し、システム・プロトタイプの適用性・有用性を検証する。試算対象構造物は、下水処理施設を構成

表-9 代替案一覧

代替案名	点検・定期補修間隔	工法規格
代替案1.	5年	D1：塗布型ライニング工法
代替案2.	10年	D1：塗布型ライニング工法
代替案3.	15年	D1：塗布型ライニング工法
代替案4.	20年	D1：塗布型ライニング工法

表-10 代替案比較評価結果の概要

エレメントグループ	劣化速度	案1.	案2.	案3.	案4.
累積トータルコストを指標とした比較					
S1：頂版	大	1	2	3	4
W2：側壁(気液境界部)	大	1	2	3	4
W3：側壁(気相部)	大	1	2	3	4
B：底版	小	2	1	3	4
W1：側壁(液相部)	小	2	1	3	4
累積コストを指標とした比較					
S1：頂版	大	3	1	2	4
W2：側壁(気液境界部)	大	3	1	2	4
W3：側壁(気相部)	大	3	1	2	4
B：底版	小	4	1	2	3
W1：側壁(液相部)	小	4	2	1	3
累積リスクを指標とした比較					
S1：頂版	大	4	3	2	1
W2：側壁(気液境界部)	大	4	3	2	1
W3：側壁(気相部)	大	4	3	2	1
B：底版	小	4	3	2	1
W1：側壁(液相部)	小	4	3	2	1

(注) 上表中、各案の列下方に記載された数字は、各評価指標における代替案の順位を示す。順位1が最も有利な代替案を、順位4が最も不利な代替案を表している。

するコンクリート構造物のうち、硫酸腐食環境下にある代表的な構造物の1つである、覆蓋を有する最初沈池（長さ30.0m×幅5.0m×深さ5.0m）である。「防食指針」では、設計腐食環境分類に応じて工法規格が定められる。対象となる硫酸腐食環境下の覆蓋つき最初沈池は、設計腐食環境分類II₂に分類され、D1（塗布型ライニング工法）かD2（シートライニング工法）のいずれかが標準的な工法規格として適用される。ここでは、補修工事において一般的に採用される工法規格であるD1（塗布型ライニング工法）に統一する。したがって、硫酸腐食環境下の下水道施設では、対策工法が工法規格によって固定されるために、点検・定期補修間隔が最適政策決定における政策変数となる。本試算で比較評価に用いる代替案の一覧表を、表-9に示す。

(2) 試算結果及び考察

シミュレーションによる代替案比較評価の概要を表-10に示す。また、代替案比較結果の例として、検討対象エレメントグループのうちW2（側壁：気液境界部、劣化速度大）とW1（側壁：液相部、劣化速度小）について、累積トータルコストを指標とした代替案比較を図-11～12に示す。さらに、構造物の劣

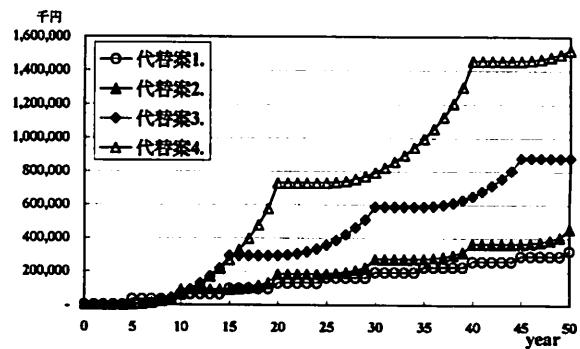


図-11 代替案比較：累積トータルコスト (W2)

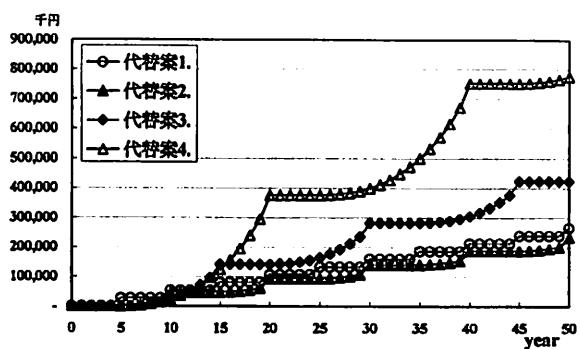


図-12 代替案比較：累積トータルコスト (W1)

化傾向と代替案比較結果との整合性を検証するために、劣化進行速度が大きいエレメントグループを一括して補修するプロジェクト「Pj : S & W2 & W3」を例として、各代替案実施時の状態遷移図を図-13～16に示す。

以下に、これらの分析結果より読み取れる経験的事項を列挙する。第1に、トータルコストを指標とした代替案比較によると、RC部の劣化が早いグループ(S, W2, W3)では代替案1（補修周期5年）が、劣化が遅いグループ(B, W1)では代替案2（補修周期10年）が最適案となっている（図-11, 12）。また、図示は割愛するが、このときにコストだけに着目して代替案比較を行うと、W1で代替案3がコスト最小となっているのを除き、全て代替案2がコスト最小となった。一方、リスクについては、当然のことではあるが、短い補修周期で早期に対策を行う代替案1が最小であり、以下代替案2、代替案3、代替案4と補修周期が長くなるにつれて、リスクは増大した。第2に、状態遷移図によると、各代替案は以下の実際的な意味を持っている。すなわち、1) 代替案1は、初期欠陥によるライニングの劣化損傷の発生がほぼ終了した時点での補修を実施する対策

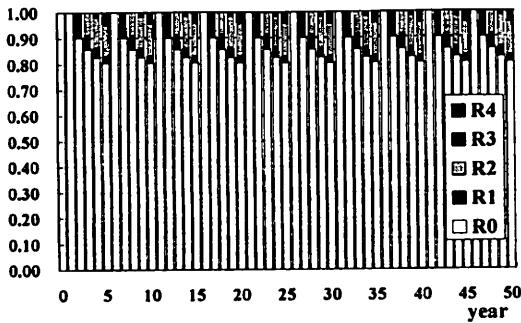


図-13 状態遷移図：代替案1. ($P_j : S \& W2 \& W3$)

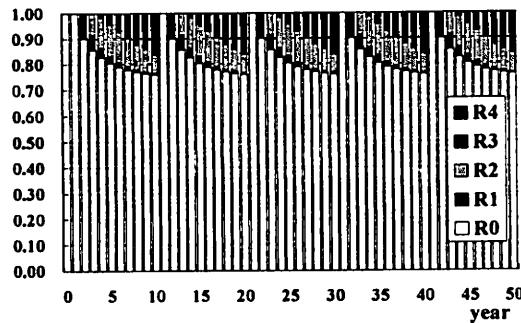


図-14 状態遷移図：代替案2. ($P_j : S \& W2 \& W3$)

案, 2) 代替案2は、初期故障期の終了後、ライニングの劣化進行が遅い速度で安定している偶発故障期が終わる直前で補修を実施する対策案, 3) 代替案3は、ライニングの摩耗故障期の途中で補修を実施する対策案, 4) 代替案4は、ライニングが防食機能をほぼ失い、RC部の劣化がかなりの程度進行した状態で補修を実施する対策案、と言える。第5に、RC部の劣化が早いグループ（「 $P_j : S \& W2 \& W3$ 」）では、補修周期が長くなるにつれて、ライニングの防食機能の喪失に伴う硫酸腐食が急激に進行し、リスク顕在化の可能性が急激に高まる（図-13～16）。

以上を総括すると、次のような結論を導くことができる。1) コスト面のみに着目した場合、ライニングの摩耗故障期に入る直前に補修を実施する戦略（代替案2）がコスト最小化の観点から有利である。2) リスクを考慮に入れたトータルコストで評価を行った場合、コストのみの評価と比較して、全般に早期の対策戦略が優位となり、特に硫酸腐食の影響を受ける部位については、この傾向が顕著となる。3) ライニングの摩耗故障期に入ってから補修を実施する戦略（代替案3・4）を採用した場合、補修対象数量が急増するとともに、リスクの顕在化の可能性も急激に高まるため、トータルコスト最小化、コ

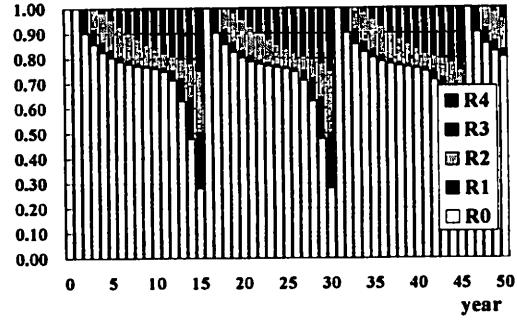


図-15 状態遷移図：代替案3. ($P_j : S \& W2 \& W3$)

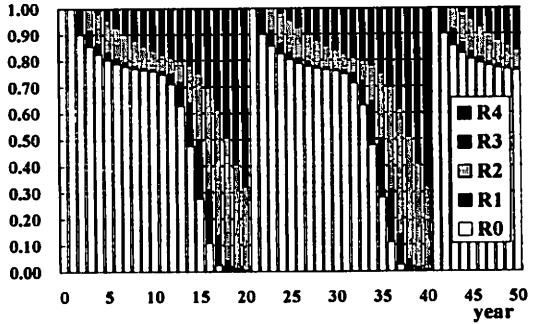


図-16 状態遷移図：代替案4. ($P_j : S \& W2 \& W3$)

スト最小化、リスク制御のいずれの観点からも不利となる。これらの結論は、先駆的な知見から見ても概ね妥当なものであり、多くの仮定の下での試算ではあるが、本システム・プロトタイプの適用性・有用性は概ね確認できたものと考える。また、「防食指針」に示されたような予防保全的補修戦略の重要性も定量的に示すことができたと考える。

5. おわりに

本研究では、コンクリートの硫酸腐食に焦点を当て、ライニングも含めたコンクリートの腐食速度の時間依存性をモデル化するために非齊次型マルコフ過程でモデル化するとともに、トータルコストを最小化する最適点検・補修政策を求めるための方法論およびシステム・プロトタイプ（シミュレーションモデル）を提案した。さらに、硫酸腐食環境下にある最初沈殿池を対象とした実証分析を通して、本手法の適用性および有用性を実証的に検証した。本検討における実証分析は、最初沈殿池の一般的なモデルケースを対象としたシミュレーションであり、今後、実在する下水道施設を対象とした実証検討が必要である。しかしながら、分析結果は、下水道分野に関わる専門技術者のこれまでの知見から見ても、

概ね妥当なものである。また、システムの出力は、予防保全型の維持管理戦略を検討していく上で、有用な情報を提供するものであると考えられる。

一方、今後、特に、1) 各種データの収集整理および入力データの精度の向上、2) 硫酸腐食過程を記述する非齊次マルコフモデルの定式化と推計方法の構築、3) 実データに基づくケーススタディを通じた現象合理性の検証、4) リスクの定量化に関する詳細検討、5) 他の下水道施設への適用範囲の拡張、6) マネジメント（複数施設の群管理）問題への拡張、といった項目について検討を継続し、検討精度を向上させつつ、その適用領域を拡張していくことが重要である。

なお、本研究の一部は、下水道事業団、大成建設、シー・エス研究所の3者による共同研究として実施された。さらに、本研究の一部（貝戸清之担当分）は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

【参考文献】

- 1) 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計、土木学会論文集、No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 2) 堀倫裕、小濱健吾、貝戸清之、小林潔司：下水道処理施設の最適点検・補修モデル、土木計画学研究・論文集、Vol.25, No.1, pp.213-224, 2008.
- 3) 青木一也、山本浩司、小林潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計、土木学会論文集、No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 4) 青木一也、山本浩司、津田尚胤、小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル、土木学会論文集、No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 5) 日本下水道事業団 編著：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル、2002.
- 6) たとえば、堀倫裕、亀村勝美、畠中千野、小西真治：リスクを考慮した土木構造物の維持管理計画手法、日本材料学会 JCOSSAR2003 論文集、T2-10, pp.503-506, 2003.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編 2007年制定、2008.

Inspection/Repair Simulation for Sewage Systems Considering Sulfate Corrosion

By Michihiro Hori, Hiroki Matsui, Kiyoyuki Kaito and Kiyoshi Kobayashi

Among the cases of deterioration and damage of sewage systems, sulfate corrosion has a risk that large-scale repair will become necessary and serious accidents will occur when deterioration progresses. Accordingly, it is imperative to design preventive maintenance policies for reducing lifecycle costs and risks for sewage systems exposed to sulfate corrosion, and it is necessary to develop a practical methodology for such kind of policy decision-making. In this circumstance, this paper describes the time dependence of the progress of sulfate corrosion with the inhomogeneous Markov chain model, and proposes a method for determining inspection and repair policies for minimizing total costs, which is defined as the sum of the lifecycle costs and risks that are estimated based on simulation. Furthermore, in order to examine the applicability and usefulness of the proposed method, the prototype of the simulation model is developed, and empirical analysis was carried out. The results show that the optimum inspection and repair policies designed based on the proposed methodology are highly consistent compared with the conventional policies and provide useful information for designing the inspection and repair policies for preventive maintenance.