

論文審査報告書

氏名	ふかたにわたる 深谷 渉
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	論博環第1号
学位授与日	平成30年9月25日
論文題目	下水道管路管理論~効率的な下水道管路管理手法に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 楠井 隆史 教授 川上 智規 教授 伊藤 始 准教授 奥川 光治 宮城大学 教授 岩堀 恵祐

内容の要旨

我が国の下水道管路ストックは着実に蓄積され、平成 27 年度末現在で約 47 万kmとなっている。下水道整備は、都市における衛生の確保及び生活環境の改善等の効果を発現してきたが、下水道事業に早く着手した都市では施設の老朽化が進行しており、経過年数 50 年を超えた管路の改築更新時期を迎えている。老朽化が進行した管路は、クラックや継ぎ手ズレなどの不具合を抱えており、管の周りにある土を管内に引き込むなどして地中に空洞を生じさせ、道路陥没等の事故を誘発する。マンホールや取付管等を含む下水道管路施設に起因する道路陥没は年間 3 千件以上であり、今後、改築を必要とする管路が益々増加することを踏まえ、適切な維持管理により、大事故に至る前に管路の異状等を発見し対処することが求められている。平成 27 年 5 月 20 日には、「水防法等の一部を改正する法律」が公布され(同年 7 月 19 日一部施行、同年 11 月 19 日完全施行)、このうち改正下水道法では、下水道管路施設の老朽化等による道路陥没が発生している現状を踏まえ、下水道管理者に対して点検の実施が義務付けられた。とりわけ管路施設の腐食の恐れの大い箇所については、5 年に 1 回以上での点検義務が付され、これにより、下水道管理者たる地方公共団体は、以前にも増して、管路施設の維持管理に積極的に関与し取り組むことが求められることとなった。

現状の管路管理は、施設保全(施設の健全性の維持)を目的とした管理に主眼が置かれており、管路の属性や埋設条件等に関係なく、統一的な頻度及び判定基準等により点検調査が実施されることが多い。例えば、頻度については、巡視・点検は概ね 3 年に 1 回、調査は 10 年に 1 回実施することが目安とされている。この頻度は、建設省都市局下水道部調査による 69 都市の管路管理に関する実態アンケー

トを元に設定されたものである。現場の劣化進行を踏まえて経験的に設定したともいえるが、予算制約的側面の影響を大きく受けている可能性があり、実際の劣化進行度が適切に反映されたものとは言い難い。また、点検調査の方法については、「巡視点検」は車両を用いた巡回パトロールが一般的であり、標準的な作業量は1日あたり3km程度、管内の劣化を診断する「調査」は、現地での定量的な劣化程度の判定が要求されることに加え、地下埋設物であることから、標準作業量は1日当たり300m程度と効率が悪い。さらには、このような調査技術の制約（低い作業量）に加え、地方公共団体における予算上の制約、脆弱な組織体制（技術者、発注職員等の不足）等も一因となり、点検調査実施率は非常に低いのが現状である。

これは、現状において頻度及び方法等が、国内外問わず、現場従事者の感覚や経験により一律的に定められているためであり、非効率な管理になっている可能性がある。このため、予防保全的な管理を行うには、管理の目的を明確にし、現場の実態や事象のメカニズム、抱えるリスクの大きさ等を十分に踏まえて、定量的、統計的に頻度や方法等を定めることで、非効率性を助長する因子を極力排除する必要がある。これにより、限られた予算等の制約下において下水道管路管理のPDCAを確実に回すことが可能となる。

下水道管路の維持管理の目的は、大別すると、下水道サービスの持続性確保（流下能力の確保）、道路陥没等の事故防止、生活環境の保全（悪臭防止）があり、これが維持管理における最終的な管理目標（アウトカム）なる。管理目標の達成には、予防保全的な点検調査が必要であるが、画一的な点検・調査手法では全てのリスクを回避することは難しいため、前出の維持管理における管理目標を踏まえて、目標達成に必要な適切な管理手法を体系化及び目標達成のための具体的な手法を確立する必要がある。

上記を踏まえ本研究では、下水道管路の維持管理の目的を、下水道サービスの持続性確保（流下能力の確保）、道路陥没等の事故防止、生活環境の保全（悪臭防止）の維持管理に大別した上で、それぞれの目的に応じた適切な管理手法を確立するために、最新の膨大な管路調査データや詳細な現地調査データ等を用いて、統計的に、そしてより実態に即した検討を実施した。

本論文は6章で構成され、第1章では緒論として、我が国における下水道管路施設を取り巻く現状を踏まえ、我が国の下水道管路管理で一般的に用いられるTVカメラ等を用いた点検調査手法と、実施上の問題点、今後の下水道管路管理に必要となる効率的な調査手法を体系化した上で、管路管理のあり方、研究の方向性について述べた。

第2章では、「道路陥没等の事故防止」及び「下水道サービスの持続性確保」に影響を与える管路施設の異状として、破損、クラック、継ぎ手ズレ、たるみといった一般的な劣化因子を対象とした点検調査頻度を3つのアプローチで検討した。1つ目は、全国で生じている下水道管路起因の道路陥没に関する実態調査を行い、管路の経過年数と道路陥没件数の関係性を分析した。2つ目は、経年的な劣化管路の割合を表す健全率曲線を用いて、信頼性重視保全に基づく必要点検調査頻度について分析した。3つ目として、人の平均余命等の計算にも用いられるSullivan法を用いて管路の健康寿命を分析した。これらの3つの分析結果を基に、管路の重要度及び不具合の進行の実態に応じたメリハリのある調査頻度の設定例として、重要監視路線を1回/10年、要監視路線を1回/15年、その他路線を1回/30年として提案した。

第3章は、「道路陥没等の事故防止」及び「下水道サービスの持続性確保」に影響を与える管路施設の異状として「腐食」を対象とした点検調査手法に関する検討を行った。下水道管路内では、下水が長時間滞留する場所などで、嫌気性微生物の働きにより硫化水素が生成され、コンクリート構造物等の腐

食を生じさせることがある。コンクリート腐食は、その進行スピードが速く、一般環境下の管路と区別して重点的に管理する必要がある。このため、腐食環境下にあるコンクリート管を対象に、既往の腐食速度予測式等を基に劣化曲線を作成したうえで、信頼性重視保全（RCM理論）の考え方に基づく必要点検頻度について検討した。腐食環境下の劣化曲線については、腐食速度予測式等が単純なコンクリートの腐食深度を示すものであるため、腐食深度と管路残存強度との関係を明らかにし、改築・修繕が必要となる経過年数を算出した。この結果、供用から鉄筋が露出するまでの期間の半分で点検すると仮定すると、対象となる管渠内の平均硫化水素濃度や管径による違いがあるものの、最低 5 年に 1 回の点検が必要であることが分かった。

第 4 章では、「下水道サービスの持続性確保」を脅かす外的要因の一つである「木根侵入」に着目した。施設の経年劣化や下水の水質等による腐食等の内的要因に対する管路管理と異なり、人為的もしくは自然発生的な外的要因は予測が難しく、管路管理は後手に回りやすい。ここでは、自然発生的な外部要因である街路樹等の樹木根の管路侵入に着目し、街路樹として植栽されている樹種の実態や樹種の違いによる根系の伸長範囲を整理したうえで、下水道管路への根系侵入事例調査を実施し、点検調査時の留意点等を取りまとめた。この結果、劣化部などの比較的強度が弱い箇所には細い根系が侵入すると、湿潤な状態にある管路内でさらに根が気根状に肥大成長し、クラック等の隙間を徐々に広げ、侵入箇所をより損傷させることとなることが分かった。また、点検調査の対象管渠が樹木による根系障害を受ける可能性があるかどうかの判定方法等を提案した。

第 5 章は、「生活環境の保全（悪臭防止）」について、都市イメージの低下や生活環境の悪化を招くビルピット排水による下水道施設からの悪臭を防止するための検討を行った。ビルピット排水に起因し下水道施設から発生する臭気への対応としては、下水道管理者によるマンホール蓋の密閉化や脱臭装置の設置等があるが、臭気はどこの開口部からも発生しうることから、施設全てを 100%密閉化することは困難であり、費用も膨大となる。このため現在では、ピットの改造やポンプ運転手法の工夫など、下水道管理者の指導に基づき、ビルピット管理者が臭気対策を施す発生源対策が東京都や京都市などで行われているが、発生源の特定が難しい（多大な費用と時間を要する）、特定し改善を指導しても法的根拠や規制値が不明確なためビル管理者側の対応が消極的等の問題があることから、改善が進んでいないのが現状である。このような状況を踏まえ、①下水道担当者の権限内で実施可能、②計測が簡単で即時に結果が分かる、③臭気の経時変化が把握できる管理手法の検討を実施した。検討に当たり、実際のビルピット（2 都市 20 棟 25 箇所）において実態調査を実施し、汚水樹の気相中硫化水素濃度とビルピット貯留水の臭気指数および液相中硫化水素濃度の関係を明らかにした。この結果、悪臭防止法の規制値（特定悪臭物質および臭気指数）を明らかに越える汚水樹の気相中硫化水素濃度は、概ね 100ppm 以上であることが分かった。これにより、悪臭の発生源と思われる建築物のビルピット排水が排出される汚水樹に拡散式硫化水素計を設置し、100ppm 以上の硫化水素が計測された場合、ビルピットにおける特定悪臭物質（液相中硫化水素濃度）もしくは臭気指数が規制値を超えると予想できることとなった。また、汚水樹の気相中硫化水素濃度と汚水樹内の気圧及び湿度の関係を調査した結果、ポンプ排水により汚水樹内の気圧や湿度に変化が現れることが分かった。この現象を活用することで、汚水樹での硫化水素濃度測定と簡易な気圧計による計測により、悪臭の発生源となっているビルの特定が可能となることが分かった。

第 6 章では、今後の展望として、厳しい予算等の制約の中で、事故等のリスクを最小限にしつつ、持続的に維持管理を実施するには、無駄のない、効率的で効果的な管理手法を選択し実践する必要がある

るとした上で、さらなるデータの蓄積及び実現場での適用事例の検証等が必要であることを示した。

審査の結果の要旨

本論文は、下水道管路に発生する道路陥没などの問題を回避するために、最新の管路調査データや詳細な現地調査データを用いて、維持管理目的に応じた調査頻度や調査方法について検討を行ったものであり、全6章で構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景、意義、目的を述べている。下水道整備に伴い管路ストックが蓄積する一方、老朽化が進行し、適切な維持管理が求められている。しかし、予算や人的制約、調査技術の性能限界等の制約により、必要な点検・調査が十分に実施できない中、管理目標（下水道サービスの持続性確保、道路陥没等の事故防止、生活環境の保全）に対して、その原因等の事象の分析に基づき、さらに、予算や人的制約を配慮した効率的な調査方法の確立が求められていた。

第2章では、一般環境下における維持管理周期について、道路陥没の実態と、管路の状態を考慮した信頼性重視保全と、健康寿命の3つの視点から検討を行った。地方公共団体（約1500団体）を対象として実施した陥没実地調査から、経過年数とともに陥没件数が増加する傾向が認められ、特に30年を超えると顕著に増加する傾向が認められた。全国12都市のTVカメラ調査データに基づき、健全率曲線を作成し、P-F間隔を求め、管種別・重要度に応じた調査頻度（概ね10年～概ね30年）を明らかにした。管路の健康寿命を「布設された管路が何らかの障害を発生し補修等の修繕を要する状況に至る期間」と定義し、Sullivan法を参考にし劣化状況に応じて管種別の健康寿命を算出した。以上の結果をもとに、管路の重要度に応じた調査頻度を提案した。提案した調査頻度によるコスト削減率を試算し、その有効性を明らかにした。

第3章では、硫化水素による腐食が想定される環境（腐食環境）下でのコンクリート管の点検調査頻度について、腐食速度予測式と管路の耐荷力を関連付け、劣化曲線を作成し、信頼性重視保全理論（RCM）に基づき点検頻度を提案した。腐食の劣化判定基準と腐食深度を関連付け、平均硫化水素濃度と管径をパラメーターとして劣化曲線を作成した。RCMに基づき、硫化水素濃度による腐食分類毎に最低点検頻度（1年～5年）を提案した。

第4章では、街路樹や庭木等の根系侵入による管路閉塞の実態をまとめ、維持管理面からみた対策を提案した。管路構造と樹木根系の特性（伸長形態、伸長範囲等）を整理し、障害事例について考察した。また、根系障害の発生要因については、管種別に根系侵入の発生割合を比較した場合、陶管、コンクリート管、塩ビ管の順に高く、管路接合部の隙間の大きさとの関係があることが推察された。以上の考察に基づき、管路への根系障害対策として、管路設計・施工時、樹木植栽、維持管理の各段階における対策手法を提案した。

第5章では、事業所ビルなどの地階で発生したトイレ排水や雑排水を一旦貯留する貯留槽（ビルピット）から発生する悪臭対策（硫化水素など）を効果的に実施するために、悪臭の発生実態を把握し、法制度を踏まえたビルピット指導管理方法を検討した。ビルピット排水規制の法的位置づけを整理し、規制値が明確で、法的な拘束力のある悪臭防止法での対応が有効であるとした。その上で、下水道担当者が立ち入り可能な汚水桝の気相中硫化水素濃度からビルピット硫化水素濃度や臭気指数を予測し、予想値が規制値を超過する場合には、施設管理者への改善要請あるいは法的指導をおこなうという管理方法を提案した。2都市計24箇所のビルピットで調査を行い、汚水桝の気相中硫化水素濃度が100ppm以下であれば悪臭防止法の規制値を超えていると予想できることを明らかにした。さらに、汚水桝の硫化水素の発生源を特定する方法について検討した。ポンプ排水により汚水桝が一時的に負圧になる現象に着目

し、ポンプ排水時の汚水柵内で気圧・湿度・温度の計測を行った。調査結果に基づき、気圧計を利用した発生源特定調査手法を提案した。また、現地調査結果を整理し、硫化水素発生の閾値として、水温 18°C、酸化還元電位 (ORP) 30mV 以下、pH8 以下を得、硫化水素抑制対策について提案した。

第 6 章では、本論文の内容を要約するとともに今後の展望について述べている。

以上で述べたように、本研究は、従来の経験や数少ないデータに基づいて設定された下水道管路の調査頻度や手順を、全国から収集した膨大な調査データ、及び現地調査による計測データに基づき、管理目的に応じた適正な管理手法を提案している。特に、下水管路の劣化曲線をもちいて信頼性重視保全理論 (RCM) を適用して調査頻度を算出したのは下水道分野では初めてであり高い独創性が認められ、結果の解釈も適切である。得られた成果は、下水道・社会基盤工学の分野において、工学的観点からきわめて重要な知見が得られており、工学の発展に貢献できると評価される。また、研究成果の一部は下水道維持管理指針等のマニュアルに採用されており現場での施設の維持管理における貢献が大いに期待される。本論文に関連する発表論文は 6 編であり、すべて申請者が筆頭のものである。

平成 30 年 8 月 9 日に博士論文の審査及び最終試験を行った。学力の確認については、水質化学、水処理工学、コンクリート工学、語学 (英語) の科目について口頭試験を行い、本学大学院博士後期課程を修了した者と同等以上の学力を有すると認めた。また、申請者は学術研究にふさわしい発表、討論ができ、本研究で用いられた研究手法と得られた結果を十分に理解していること、当該分野に関して博士としての十分な学識と独立して研究を遂行する能力を有するものと判定され、博士 (工学) の学位論文として合格であると認められた。