

氏名	石渡 恭之		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	甲博理工第470号		
学位授与年月日	平成26年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	水道管網における管内流水中の懸濁物質の挙動と老朽化の評価		
審査会	主査	藤田 昌史	委員 三村 信男
	委員	横木 裕宗	委員 小峯 秀雄
	委員	長岡 裕	

論文内容の要旨

わが国では高度経済成長期に多くの水道施設が建設されたが、現在、それらは更新の時期を迎えている。例えば、法廷耐用年数(40年)を超えて使用されている水道管路は、2011年現在で43万km(全管路延長の約7%)存在している。更新を要する管路延長は膨大であるため、水道事業者では更新の優先度の決定が課題となっている。優先度を定める際には、布設時期、事故時の需要者への影響度、事故履歴、土壌の腐食性などの情報が利用されているが、水道管自体の実際の老朽化の度合いに関する情報も利用できるとより適確な判断が可能となる。水道管の老朽化のうち、内面の状況を調査する技術としては、現在、水中カメラによる調査方法が実用化されている。目視により確実な情報が得られるが調査コストが高い一面もある。更新の優先度決定に用いるためには多地点を調査する必要があるため、より低コスト・簡易な調査方法があると有用である。管内流水の水質が水道管の内面状況の影響を受けるならば、消火栓から採水し水質を解析する手段も考えられる。

水道管内面の老朽化による管内流水の水質への影響に関しては、これまでも腐食の影響で管内流水中のFe濃度が上昇する等の報告がされている。しかし、わが国で供用されている水道管は、多くの場合、腐食防止のためモルタルや樹脂によるライニングが施されている。また塩化ビニル管が使われている地域も多い。調査方法としての水質解析の可能性を検討するにあたっては、それら複数種の水道管が存在することを踏まえたうえで、水質にみられる水道管の老朽化に関する情報の知見を整理する必要がある。

そこで本研究は、水質解析により得ることが可能な水道管の老朽化情報を見出すことを目的とし、水道管の管材、ライニング、腐食、内面付着物などに含まれる元素を分析し、水道管が管内流水中の元素組成へ影響を与える可能性を整理するとともに、種類や経年状況が異なる水道管が混在する水道管網における管内流水中の懸濁物質の挙動を解析した。

供用中および供用後の各種水道管の内面を観察し、経年した水道管に起きる老朽化現象を確認した。その結果、無ライニング管における腐食の発生、ライニング管や塩化ビニル管における褐色物質の付着などの現象が確認された。また、ライニング管においても管と管の継ぎ目部などに腐食が発生する場合があることがわかった。次にモルタルライニング管、樹脂ライニング管、塩化ビニル管の管材やライニングを蛍光X線分析法に

て分析し元素組成を整理した。併せて内面の付着物や腐食生成物についても分析して比較して比較すると、腐食生成物や付着物は管材やライニングにはない元素も含有しており、水中からそれらの元素の沈着が起きていることが示唆された。水道管の管材やライニングの水中への流出や、腐食や付着物の懸濁により、管内流水中の元素濃度に影響する可能性が考えられる。水道管片を水中に浸漬して水中への元素の移行量を分析すると、モルタルライニング管で溶存態のCaが上昇したほか、各管において懸濁態元素の上昇がみられ、ライニングや付着物などが水中の溶存態、懸濁態元素の濃度に影響を及ぼすことが示された。

そこで、実際の水道管ネットワークにおいても水道管の種類や経年による水質への影響が確認されるか調査を行った。ライニングの流出や腐食生成物、付着物の懸濁の発生を想定して管内流水中の懸濁物質に着目し、存在割合の高い懸濁態Al, Si, Ca, Mn, Fe, Znを解析した。Al, Mn, Feは互いに相関が強く、またAl, Caの間にも強い相関がみられ、Al, Mn, FeやAl, Caをそれぞれ共に含む懸濁物質の発生源が管内にあることが示唆された。懸濁態濃度の変化量により主成分分析を行うと、水道管のライニングの種類やモルタルライニングの供用年数毎に近い主成分得点が得られた。また、第一主成分はMn, Fe, Alと強い正の相関、第二主成分はCaと強い負の相関を有しており、それぞれ腐食の影響、モルタルライニングの老朽化の影響を示していると推定された。

さらに懸濁物質の流下に伴う組成変動、粒径毎の組成、化学形態について解析した。採取地点間の距離間隔が180~1360mである9区間における懸濁物質の組成の変化について、非類似度を用いて評価すると、距離が180mであっても他区間よりも大きい組成変化をしている場合があり、懸濁物質の組成は採取地点付近の水道管の内面状況による影響を示し得ることが示唆された。また25 μ m, 97 μ mを区切りに3段階の粒径別に分画して濃度、組成を分析した結果、懸濁物質は小さい粒径側に多く存在していた。腐食やモルタルライニングの老朽化と関連の高かったFeやCaは、それぞれ97 μ m以下、25 μ m以下の粒径に存在しており、粒径による偏在がみられた。さらに懸濁態のFe, Caの化学形態をX線吸収微細構造分析および光電子分光分析にて分析した結果、Feの形態の割合をFe₃O₄, α -FeOOH, α -Fe₂O₃の3種から成るとして計算すると、Fe腐食が懸念される地点ではより酸化側に進んだ酸化形態のFeの割合が多い傾向がみられた。またCaについてもモルタルライニングの経年状態によって化学形態が異なることが示された。

以上を総括すると、まず、管内流水中の懸濁物質の組成の変化を解析することにより、水道管内面の老朽化状況を推定できる可能性が示された。モルタルライニング管のライニングの老朽化や腐食についてはCaやFeの濃度に併せ、その酸化形態も指標になると考えられる。CaやFeは存在する粒径に偏在があり、推定精度の向上に活用できる可能性がある。樹脂ライニング管や塩化ビニル管では、経年により管由来ではない元素が付着することを利用して、古い管の検知が可能であると考えられる。180m程度の流下距離でも懸濁物質の組成の変化はみられるため、老朽化をみる際の採水地点間の距離もその程度まで小さくすることが出来る。本研究により、管内流水中の懸濁物質に着目して老朽化の評価する方法の基礎を構築できた。

論文審査の結果の要旨

わが国では、法定耐用年数を超えた水道管の更新の優先度の判定をするため、水道管の老朽化状況を把握する必要性が生じている。水道管内面の老朽化状況を管内流水中の水質から診断できれば、実務的に有用な手法となる。そこで本論文では、わが国で広く普及しているモルタルや樹脂によるライニングが施された水道管や無塗装の鋼管を対象として、水道管の管材・ライニングの種類や供用年数と管内流水中の水質の関係を解析した。

供用後の水道管のライニング、褐色の付着物、腐食生成物の元素を蛍光X線分析法により測定した。そして、供用後の水道管を用いてバッチ試験を行ったところ、管材・ライニングや付着物に由来する元素の溶出・移行が認められたことから、管材・ライニングの現況が水質に影響を及ぼすことが確認された。

水道管網上の消火栓から採水して捕集した懸濁物を対象として、水道管の管材・ライニングの種類や供用年数の違いにより見られる元素(Al、Si、Ca、Mn、Fe、Zn)組成の特徴を解析した。懸濁態元素間の濃度の相関を調べたところ、Mn、Fe、AlおよびCaとAlの相関が強かった。既報では、Mn、Fe、Alは管内流水中に混入する起源が異なると報告されているが、水道管内にはこれらの3元素を含む懸濁物の発生源が存在する可能性が示された。懸濁態元素濃度の変化量に着目して主成分分析を行ったところ、無ライニングの鋼管ではMn、Fe、Al、モルタルライニング管ではCaが懸濁物組成の変化に寄与していることが見出された。つまり、管内流水中の懸濁態元素組成から腐食やモルタルの老朽化を検出できることが示された。

懸濁物質に関するより詳細な情報を得るために、流下過程における挙動、粒度分布、Fe、Caの化学形態を解析した。その結果、懸濁物質濃度、組成の増減は180m程度の流下距離でも見られること、Caは粒径 $25\mu\text{m}$ 以下の懸濁物質にのみ含まれること、腐食が進行している地点では $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の占める割合が高く、モルタルの経年状況によりCaの化学形態が異なることを明らかにした。これらの知見は、水道管内面の老朽化状況をより明瞭に見出すことができる可能性を示している。

本論文は、水道管内の懸濁物の挙動を水道管の管材やライニング、供用年数と関連づけて整理しており、先行研究にはない新しい切り口でアプローチしている。その結果、管内流水中の懸濁態Fe濃度やその酸化形態、懸濁態Ca濃度に着目することにより、水道管内面の腐食、モルタルライニングの老朽化をそれぞれ捉えられることを見出している。これは、老朽化が著しく進行しつつあるわが国の水道管網において、所定の間隔で配置されている消火栓から採水し、その懸濁物組成を解析することにより、広域的に水道管の老朽化状況をスクリーニングできる可能性を示しており、実務的にも価値のある知見である。以上より、本論文は博士(工学)の学位論文として合格であると判定する。