

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：52601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14685

研究課題名（和文）埋設配管の面内曲げ変形振動モードを用いた老朽度センシング法の開発

研究課題名（英文）Deterioration diagnosis of buried pipe using in-plane bending mode vibration

研究代表者

高田 宗一郎（Takata, Soichiro）

東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：30835517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、水道管路の維持管理効率化のための、水道管の面内曲げ変形振動モードを利用した埋設配管の老朽度センシング法の確立である。該当の振動モードの固有振動数は、管の厚さに対して1次式で比例する性質を有し、腐食による減肉に対して最も感度の高い振動モードである。本研究では地盤弾性支持下における埋設管の面内曲げ変形振動モードの振動現象の解明と診断法へのフィードバックを目標として、研究開発をおこなった。その結果、埋設管の面内曲げ変形振動は埋設土の土壌水分量に応じて漸硬ばね特性、漸軟ばね特性などの挙動を示すこと、また診断アルゴリズムのIoTセンサー実装法に関する知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状、埋設水道管の維持管理は漏水音調査に基づく事後保全方式による更新が更新周期による時間計画保全に頼っており、水道管の更新が追いついていない。漏水音が生じている場合、時として断水につながるリスクを抱え、住民の生活を脅かす可能性を秘めている。本研究では、埋設管の現状品質を評価する手法を研究開発するものであり、現時点でまだ共用可能な水道アセットを棚卸し、また近い将来に漏水事故につながる水道管を洗い出し、効率的な維持管理に資するものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose is to establish a method for the deterioration diagnosis of buried pipes using the in-plane bending vibration mode of water pipes, in order to improve the maintenance efficiency of water pipes. The eigen frequency of the in-plane bending vibration mode has the characteristics of being linearly proportional to the thickness of the pipe, and is the vibration mode with the highest sensitivity to wall thinning due to corrosion. In this study, research were carried out with the goal of clarifying the vibration phenomenon of the in-plane bending vibration mode of the buried pipe under ground support and providing feedback to the diagnostic method. As a result, it was found that the in-plane bending vibration of the buried pipe represents behaviors such as a hardening spring characteristic and a softening spring characteristic depending on the soil moisture content of the buried soil.

Moreover, the implementation method of diagnosis algorithm to IoT sensor was considered.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：埋設管 面内曲げ変形振動モード 非線形振動 振動診断 IoTセンサー

1. 研究開始当初の背景

我が国では、高度成長期に大量に敷設された水道管が 40 年の耐用年数を超え、その結果、漏水事故や破裂事故が発生し、有収率の低下や断水被害に伴う経済損失が発生している。事故を防止するためには、水道管の積極的な更新が望まれるが、給水人口変動に伴う水道事業体の経営状況の悪化により、効率的な更新計画に基づく実施が望まれている。更新を効率化するためには、水道管の老朽化状況を定量的に把握することが重要である。しかしながら、橋梁や道路といった他のインフラ構造物と異なり、水道管は埋設されており目視観察が困難である。老朽状況調査のために、給水人口 10 万人以上の中大規模の水道事業体では、開削工事をおこない水道管外表面の腐食状況を調査する管体環境調査を実施しているが、調査費用が高額であり、国内全ての水道事業体で実施することは困難である。このため現状では、路面からの漏水音調査に基づく、漏水後の事後保全に頼らざるを得ない状況である。以上の背景から、埋設水道管の老朽度を非開削で評価する技術は、水道管更新に係るコストを圧倒的に低減させ、今後の日本の水道を支えるムーンショットとなる。破裂事故を起こした水道管では、黒鉛化と呼ばれる腐食が生じており、腐食部では応力を受け持つことができず管厚が減少した状況となる。

そこで筆者は、埋設管の老朽度診断に向けたセンシング法として、水道管の面内曲げ変形振動モードに着目した老朽度診断法を提案している。これは地下式消火栓などの付帯物に加速度センサを設置し、ハンマーで打撃または加振器で励振するなどして当該振動モードを誘起し、その固有振動数を計測し分析することで、埋設管の平均管厚を推定する手法である。面内曲げ変形振動モードの固有振動数は、管厚に対して比例し、減肉に対して高い感度を有することが期待される。

実際の水道管は埋設されているため、管の周囲は土壌で覆われている。土は材料非線形性を有することを意味しており、埋設された水道管は非線形ばね、非線形減衰からなるダッシュポットで近似される地盤弾性によって支持された状況になると想定される。したがって、面内曲げ変形振動モードは地盤弾性と連成した非線形振動を生じる可能性があり、正確な老朽化状況の把握には、地盤の非線形性を考慮した分析が必要になる。さらに、腐食により減肉が進行すると、平均管厚が減少する。平均管厚が低下すると薄肉構造となり、非線形弾性を発生する。埋設によって生じる地盤弾性や減肉由来の薄肉構造の非線形弾性が、面内曲げ変形振動モードに与える影響について解明し、補正式を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、面内曲げ変形振動モードを用いた埋設管の老朽度診断法の確立に向けた、地盤弾性支持下における埋設管の面内曲げ変形振動モードの振動現象の解明にある。

3. 研究の方法

埋設管の面内曲げ変形振動モードの振動現象を解明するにあたり、図 1 の模型管路を作製した。模型管路は高さ 700mm、幅 420mm、長さ 900mm の空間を持ち、厚み 10mm のアクリル板で構成した。管をはめ込むため、レーザー加工で径 100mm の穴あけをおこない、供試管を隙間なく設置できるように工夫した。埋設土には東京高専内の傾斜地にある関東ローム層の粘土質の土を用い、より実際の埋設環境に近い状況を模擬した。供試管には、平均口径 100mm、長さ 1000mm のアルミの管を用いた。後に減肉検出能を評価するため、元管厚 3mm の供試管をフライス盤で長さ 780mm、幅 13.6mm、切削深さ 2mm の溝を 18 本作成し、平均管厚が減じた状況を模擬した。この模擬減肉管の平均管厚は 1.78mm となる。本実験系に実験モード解析法を適用し、埋設環境による面内曲げ変形モードの振動挙動の可視化をおこなうとともに、自由減衰振動の計測をおこなった。

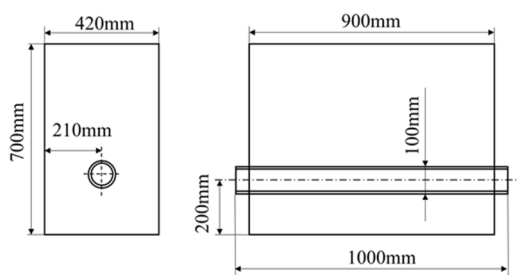


図 1 模型管路の外形図

自由減衰振動の解析には、筆者が開発した AR 時系列解析法を用いた非線形復元力特性法を用いた。薄肉円筒殻およびその埋設環境では 3 次非線形や 2 次非線形など単独の非線形要素だけではない、より広範囲な複雑な振動挙動の発生が予期されるため、振動解析手法の伸長・深化として、AR 時系列解析法を用いた非線形復元力特性法の拡張をおこなった⁽¹⁾。また AR 時系列解析法の円環振動系への適用検討も並行しておこなった⁽²⁾。

4. 研究成果

実験モード解析した結果を図 2 に示す。平均管厚 3mm の埋設管では 1047Hz に明瞭な面内曲げ変形振動が観察された。本研究で作成した供試管路では埋設の有無、平均管厚に関わらず、明瞭な面内曲げ変形振動のモード形状が確認された。これより、本研究で作成した供試管路は本研

究の解析に耐えうるものであると判断した。

自由減衰振動に AR 時系列解析法を適用した結果を図 3 に示す。横軸は周波数、縦軸は自由減衰振動の波形の振幅を示す。図 3(a)は平均管厚 3mm の管を埋設した結果、図 3(b)は平均管厚 1.78mm の管を埋設した結果をそれぞれ示す。いずれの結果においても、大振幅時から小振幅時にかけて振動数が変化する非線形自由振動の挙動を確認することができた。大振幅時に固有振動数が増加する系は漸硬ばね特性と呼ばれ、固有振動数が低下する系は漸軟ばね特性と呼ばれる。図 3(a)は明瞭な漸硬ばね特性を示している。本結果を裏付けるため、埋設土の上に剛体板を置き、おもりを付与することで分布荷重を与えた静的な変位復元力特性の計測をおこなった。(図 4)。図中横軸は管の半径方向変位、縦軸は重りの荷重を示す。図 4 は変位の増加に伴い、荷重が漸増する漸硬ばね特性を示しており、この実験結果から図 3(a)の結果の傾向と一致している事がわかった。

他方、図 3(b)に示す薄肉埋設管の場合には、AR 時系列解析の結果は複雑な形状を示した。大振幅の場合には、振幅の増大に伴って振動数が低下し、その後振動数は増加し、さらにその後、振動数が減少した後に一定値に収束する挙動となった。これは振幅の大きさに呼応して、埋設土に由来する漸硬ばね特性と、薄肉管の構造非線形に由来する漸軟ばね特性が競合することで生じた結果であると考えられる。薄肉管のみを模擬した管を用いた予備実験の結果、薄肉管は漸軟ばね特性を示した(図 5)。この系に AR 時系列解析法を適用すると振幅の増大に伴い振動数が減少する挙動を得た。したがって、管の薄肉化により生じる漸軟ばね特性と埋設土により生じる漸硬ばね特性が競合した結果として、薄肉埋設管では複雑な非線形自由振動挙動が表されることが明らかとなった。これら非線形自由振動の固有振動数の変化挙動は線形固有振動数の 10%程度であった。管厚の推定をおこなうにあたり、非線形性の影響を除去する事を考える。元管厚の製造時のばらつきは $\pm 1\text{mm}$ 程度あり、これに対する固有振動数の変化と同程度の影響があることがわかった。したがって管厚推定における上記の除去方式としては、管厚さの推定値の直接推定をするのではなく、推定管厚の幅と周波数の幅に対応をつけ、離散数値化することで、管厚状況を段階的に判定する判別問題の形に定式化することが有効であることがわかった。

非線形性の影響を除去する方式として、判別問題として定式化することが有効であることが判明したため、円環振動の判別を、安価な IoT センサーを用いて実際に判別できるか否かについて検討をおこなった⁽³⁾。上述の非線形性に伴う固有振動数の変化量や製造時の管厚ばらつきなどを考慮して、周波数帯域制限フィルタの上限周波数と下限周波数を決定し、2 バンドの周波数帯域制限フィルタを構成した。また、周波数帯域制限フィルタを IoT センサーに実装して動作させた。周波数帯域制限後の波形の振幅を用いて、線形判別器を用いた診断モデル、判別分析器を多項式カーネルのサポートベクトルマシンに拡張した診断モデル、白色雑音励振を受ける円環理論の物理モデルに基づく簡易診断モデルの合計 3 種類の判別器を設計して IoT センサーに実装し、評価をおこなった。模擬減肉による固有振動数のシフト量と IoT センサーの計測制約(実効サンプリング周波数 1500Hz 以下程度、A/D 変換ビット数、計算の桁精度)から管の老朽化状況を表すために 2 値判別が現時点で実装可能と判断した。また精度評価の結果、サポートベクトルマシン、物理モデルに基づく簡易診断モデル、線形判別法を用いた診断モデルの順に精度が高かった。今後、診断モデルのさらなる見直しにより、3 値以上の判別が行えるよう精度改良をおこなっていく方向性が考えられる。

<引用文献>

- (1) Soichiro Takata, Mikane Habashi, Susumu Terao, Nonlinear stiffness identification based on AR time series analysis using transient free oscillation, Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System, Vol. 4, No. 1 (2021), pp.26-35.
- (2) Soichiro Takata, Application to nonlinear circular ring of nonlinear system identification based on AR series analysis, Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System, Vol. 5, No. 1 (2022), pp.1-10.
- (3) Naoko Watanabe and Soichiro Takata, Proposal of simplified discrimination method for pipe inspection using vibration sensing actuation devise, Proceedings of the 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, (2023).

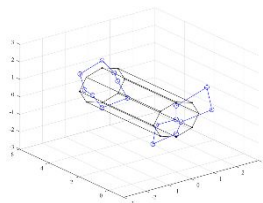
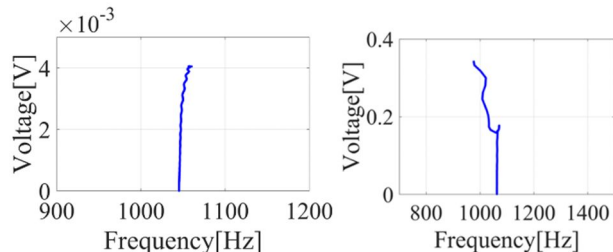


図 2 面内曲げモード形状



(a) 3mm の場合 (b) 1.78mm の場合
図 3 AR 時系列解析の結果(周波数-振幅)

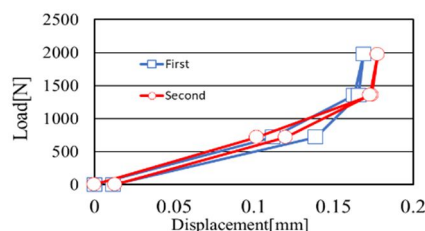


図 4 静的変位復元力特性

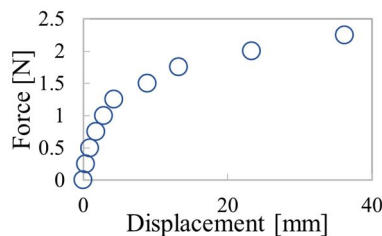


図 5 薄肉管の変位復元力特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takumi Ito, Soichiro Takata	4. 巻 4
2. 論文標題 Vibration analysis of in-plane bending mode in coupled cylindrical shell using coupled circular ring model for pipe thickness estimation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 23-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Soichiro Takata	4. 巻 2
2. 論文標題 Application to nonlinear circular ring of nonlinear system identification based on AR time series analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Soichiro TAKATA, Mikane Habashi, Susumu Tarao	4. 巻 4
2. 論文標題 Nonlinear stiffness identification based on AR time series analysis using transient free oscillation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 26-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Soichiro Takata, Riki Tanahashi, Shuya Kubota and Naoko Watanabe	4. 巻 in-printing
2. 論文標題 Vibration-sensing-actuation device for pipe diagnosis using in-plane bending vibration mode (in-printing)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 in-printing
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Soichiro TAKATA, Shuya KUBOTA and Naoko WATANABE	4. 巻 in-printing
2. 論文標題 Prototyping of vibration-sensing-actuation device to realization of future intelligent infrastructure (in-printing)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 in-printing
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 高田 宗一郎
2. 発表標題 埋設環境下における円筒殻の面内曲げ変形振動の解析
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics and Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 新一, 高田 宗一郎
2. 発表標題 埋設環境下における円筒殻の変位復元力特性の解析と等価粘弾性モデルの提案
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 第19回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺 那緒子, 高田 宗一郎
2. 発表標題 接続管を介して白色雑音を励振される円筒殻の面内曲げ変形振動の解析
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 第19回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島 義弘, 高田 宗一郎
2. 発表標題 埋設環境下における円筒殻の面内曲げ変形モードの自由振動の瞬時周波数解析
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 第19回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soichiro Takata
2. 発表標題 Trial of application to nonlinear ring of nonlinear identification method based on AR time series analysis
3. 学会等名 Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2021 (ICTSS 2021) Invited Paper (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soichiro Takata, Mikane Habashi
2. 発表標題 Nonlinear spring constant estimation using Auto-Regressive time series analysis based on instantaneous frequency
3. 学会等名 Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部 友哉, 高田 宗一郎
2. 発表標題 埋設環境下における極薄円筒殻の面内曲げ変形振動の実験
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 27 期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 健太郎, 高田 宗一朗
2. 発表標題 内面モルタルを有する円筒殻の振動実験
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 27 期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoko WATANABE and Soichiro TAKATA
2. 発表標題 PROPRSAL OF CONTROL AND SIGNAL PROCESSING METHOD FOR REALIZATION OF PIPE INSPECTION SYSTEM BASED ON RING MODE OF FORCED VIBRATION
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoko Watanabe and Soichiro Takata
2. 発表標題 Proposal of simplified discrimination method for pipe inspection using vibration sensing actuation device
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuya Kubota and Soichiro Takata
2. 発表標題 Development of high-power vibration actuator systems for water pipe diagnosis
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------