

一般財団法人新潟県建設技術センター  
研究助成事業

報 告 書

平成 31 年 3 月

新潟大学自然科学系（農学部）

鈴木哲也

## 1. 概要

本報告書は、一般財団法人新潟県建設技術センター平成 30 年度研究助成事業に係わる研究成果を取りまとめたものである。

### 1-1. 申請課題名

弾性波計測を援用した配管施設の非破壊損傷検出法の開発～長期供用下の上下水道施設を対象として～（継続研究）

### 1-2. 申請者

新潟大学自然科学系（農学部） 教授 鈴木哲也

### 1-3. 研究目的

上水道や下水道に代表される配管施設は、社会基盤施設の中でも大規模地震に代表される突発的災害が発生した際に道路などと比較して復旧に困難が伴う。本申請では、上下水道施設を対象に既存施設から発生する圧力波を検出し、管内で発生する「流れ場」と「材料損傷」の非破壊計測法を構築することを目的とする。2018 年度は、モデル試験を実施した後に佐渡地域の大規模施設での実環境下での計測を通して、開発技術の高度化を試みる。

### 1-4. 研究成果

本申請課題に関連する 2 か年の研究成果を以下に列挙する。

#### (1) 論文

- 1) **Tetsuya Suzuki** and Yuma Shimamoto: Use of Acoustic Emission Parameter for Detection of Hydraulic Conditions in service Pipeline System, Progress in Acoustic Emission X I X, pp. 261-264, 2018.
- 2) **Tetsuya Suzuki** and Yuma Shimamoto: On-site damage evaluation of cracked irrigation infrastructure by acoustic emission and related non-destructive elastic wave method, Journal of PAWEES, (Accepted).
- 3) **鈴木哲也**, 塩谷智基: AE 計測に基づく送配水パイプラインの非破壊モニタリング法の開発, 農業農村工学会誌, 86 (4), pp. 277-280, 2018.

#### (2) 口頭発表

- 1) **Tetsuya Suzuki** and Yuma Shimamoto: Quantitative Risk Evaluation of Irrigation Infrastructures by using Non-Destructive Inspection, PAWEES-INWEPF International Conference Nara 2018, pp. 206, 2018.
- 2) 高橋健一, 島本由麻, **鈴木哲也**: AE パラメータを用いた大規模送水パイプラインの圧力波伝搬特性の定量評価に関する研究, 第 45 回土木学会関東支部技術研究発表会要旨, 2018.
- 3) **鈴木哲也**, 島本由麻: 弾性波エネルギー指標を用いたパイプラインに発生した圧力波の検出, 平成 30 年度農業農村工学会講演会講演要旨集, CD-R, 2018.
- 4) **鈴木哲也**, 島本由麻: AE パラメータ解析に基づく大規模送配水パイプラインの圧力波伝搬特性評価～緊急遮断の性能評価を事例に～, 平成 29 年度 JSNDI 第 2 回アコースティック・エミッション部門講演会, pp. 13-20, 2017.
- 5) 本田泰大, **鈴木哲也**, 中達雄, 樽屋啓之: AE パラメータを用いたパイプラインの水利機能評価に関する研究, 平成 29 年度農業農村工学会講演会講演要旨集, CD-R, 2017.
- 6) **鈴木哲也**, 島本由麻, 高橋健一: 送配水パイプラインに発生させた圧力波の AE パラメータによる検出, 第 21 回 AE 総合コンファレンス論文集, pp. 17-20, 2017.

## 2. 研究成果（概要）

### 2-1. はじめに

上下水道や産業用水の送配水には、内水圧を利用したパイプラインシステムが用いられている。主な管材は鋼管やダクタイル鋳鉄管であり、近年の ICT や AI, IOT の流れの中で、それらを対象とした情報技術による非破壊検査精度の向上が試みられている。上下水道や水利施設関連分野では、一例として森ら<sup>1),2)</sup>による水路トンネルを対象とした変状調査システムの開発や周藤ら<sup>3),4)</sup>によるコンクリート水利構造物を対象とした現位置での動弾性係数評価法の開発などがある。本助成課題では、弾性波を受動的に検出する AE (Acoustic Emission) 法<sup>5)</sup>を用いて配管内に発生した圧力波（水撃圧）を利用した非破壊検査法の構築を試みるものである<sup>6),7),8)</sup>。2017 年度助成事業では、全長は約 18 km、管径φ1,000～600 mm である鋼管パイプラインにおいて圧力波を発生させ弾性波計測に成功した<sup>6),8)</sup>。その際新たに開発した無線 AE システムの有用性を確認した。2018 年度助成事業では、新たに画像解析を導入し、非破壊かつ非接触による圧力は振動の検出をモデル試験と既存施設で試みた。

本報では、2018 年度助成事業で試みた実験的検討結果を概説し、開発成果の上下水道施設への適用の可能性と技術的課題を明らかにする。

### 2-2. 画像解析による圧力波検出 ～モデルパイプライン試験～

#### (1) 計測モデル

モデルパイプラインは、対象施設は水槽～管路～バルブからなる単一管路で、延長約 900 m、外径 27.2 mm、管厚 1.5 mm である。管体は写真 1 に示すように螺旋状に敷設され、管種は SUS304（ステンレス鋼）、対象施設の圧力波伝播速度は 1,310 m/s である。

実験的検討では、管内の水圧変動を測定するため、電磁弁より 1.77m 上流に既設の圧電素子型圧力計を使用した（図 1）。本計測では、2017 年度助成事業同様、AE 法による弾性波計測も実施した。



写真 1 モデルパイプライン全景

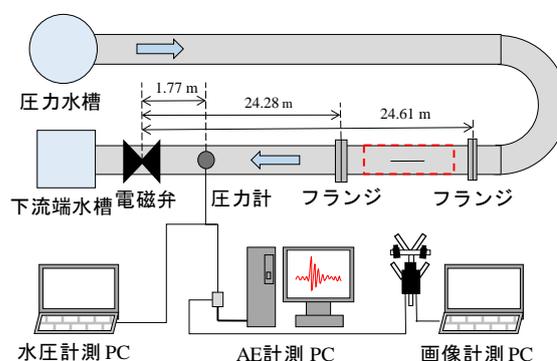


図 1 計測機器配置図



写真 2 撮影状況

#### (2) 画像解析方法

電磁弁より 24.28 m～24.61 m 上流のフランジ間を対象に画像計測による管体変形計測を実施した。撮影には CCD カメラ 2 台から構成される計測装置および 1 台の高速度カメラを使用した（写真 2）。

#### (3) 検討結果・考察

計測水圧の一例を図 2 に示す。図中の緑線はバルブ開放（通水開始）時間を表し、赤線はバルブ閉塞の時

間を表す。バルブ閉塞直後に管内の水圧がバルブ閉塞前の約 10 倍まで急激に上昇していることが確認できる。本実験では、本圧力波信号を管体外面からの画像解析により検出することを試みた(写真 2)。管体変形計測における方向の定義を図 3 に記す。図 3 上は画像解析画面であり図 4 で確認できるように縦に y 軸、横に x 軸を取る。x 軸上で管体を切り開くと管体は図 3 下のように展開される。水圧を受けた管体に働く応力やひずみはこの平面上に生じるため、画像解析画面とは別に管の延長方向を軸方向、軸方向に対して直角に交わる方向を軸直角方向と定義する。管内を圧力波が伝播するとスリット近傍において応力集中が生じると予想されるため、スリット両端に 1 点ずつ抽出点を定め、上流側スリット端部より x 方向に 20 mm、y 方向に -5 mm の地点に抽出点を定めた。加えて、スリット側部としてスリット両端の中間に 1 点抽出点を定めた。また、非欠損部として、各抽出点とスリットの位置関係を図 4 に示す。

検討結果の一例を図 5～図 7 に示す。図中の橙線はスリット端部における軸直角方向の最大ひずみ観測時間を示し、緑線は最大水圧観測時間もしくは水撃圧の作用中に軸直角方向ひずみに顕著なピークが確認できる場合はその時間を  $e_{yy}$  ピーク時間として示した。

圧力波起源の水圧上昇と軸直角方向ひずみの上昇が明確に確認された(図 5, 図 6)。スリット近傍の応力分布の理論値と解析値の比較を図 7 に示す。スリット近傍での応力集中が確認できる。

これらのことから、画像解析により非破壊・非接触による水撃圧の検出や管内水理現象、管体応力場の評価が可能であり、損傷度評価の可能性が本試験により示唆されたものと推察される。

## 2-3. 既存施設での圧力波発生実験

### (1) 計測施設

計測対象は、2017 年度助成事業と同一の施設で実施した。配水システムは水槽～単一管路～バルブ系の送水パイプラインである。全長は約 18 km、管径  $\phi$  1,000～600 mm である。管種は鋼管およびダクタイル鋳鉄

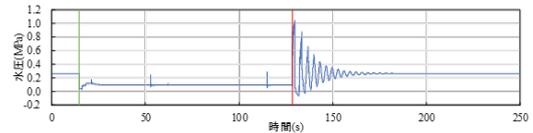


図 2 検出した圧力波

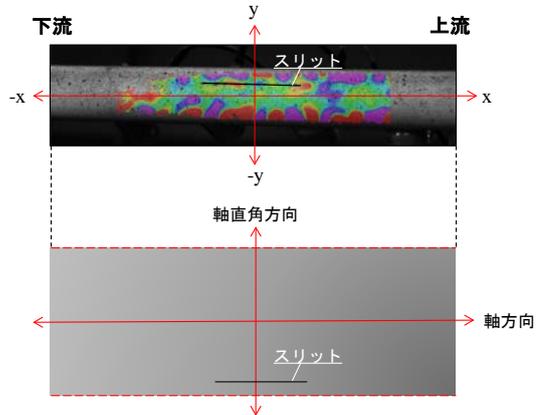


図 3 管体における方向の定義

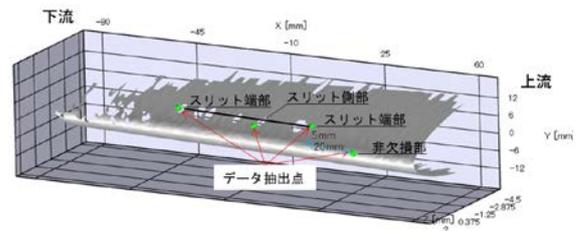


図 4 データの抽出点

管である。システム内部の設計最大水圧は 2.618 MPa (静水圧=1.868 MPa, 水撃圧=0.750 MPa) である。本試験では、昨年度と同様、弾性波による圧力波の同定を計測対象に実証的検討を試みた。

### (2) 弾性波計測方法

実証的検討では、計測対象である既存施設において、AE 計測を止水状態から全開をへて、末端バルブの緩閉塞により圧力波を発生させて実施した。計測地点は、末端バルブ操作地点に加えて、末端から約 10 km (図 10, 最大水圧地点) および末端から約 18 km の 2 地点である。圧力波の発生点は末端バルブ操作地点である。その他の 2 地点は AE 計測のみを実施し、バルブ操作は行っていない。圧力波の規模は、計測施設に設置した水圧計により取得し、管内の圧力変動を同定した。AE 計測条件は、閾値 42 dB, 増幅 60 dB, 使用センサ 150 kHz 共振型, 60 kHz 共振型, 30 kHz 共振型を使用した。

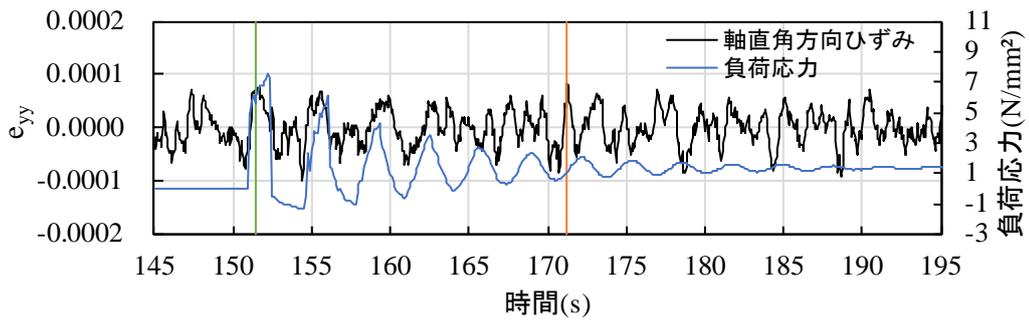


図5 負荷応力と軸直角方向ひずみの時系列変化（スリット端部，圧力波伝搬時）

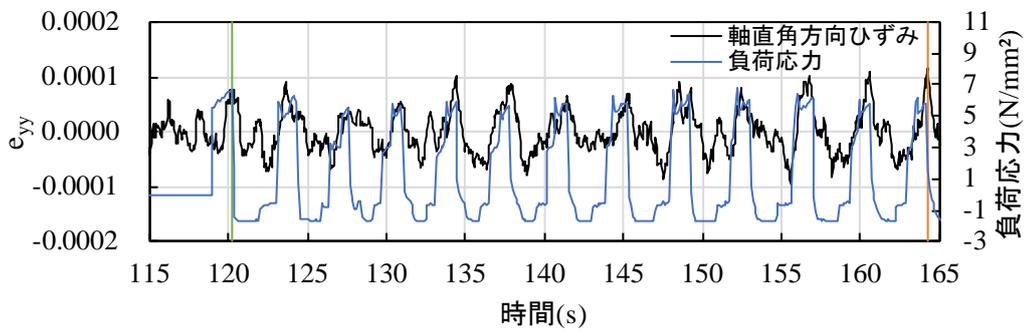


図6 負荷応力と軸直角方向ひずみの時系列変化（スリット端部，水圧変動時）

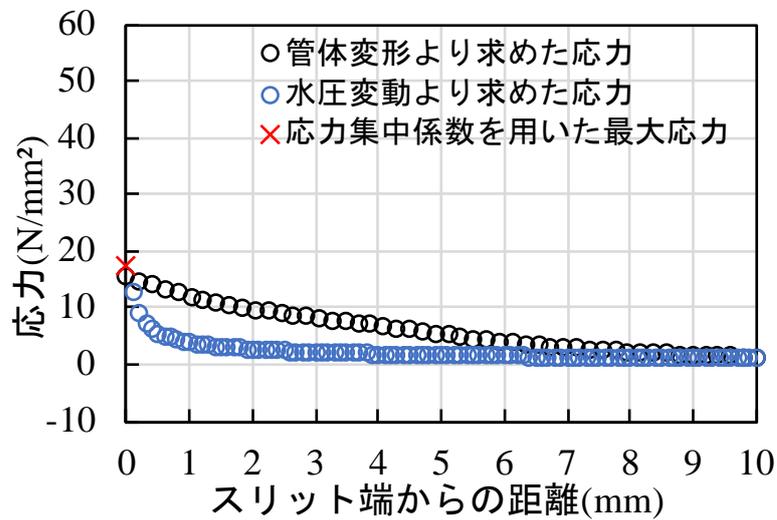


図7 スリット近傍の応力場（図5，171.25 s）



小倉調圧水槽からの距離	管種	管径	管厚
0 m ~ 9494.7 m	鋼管 (SP)	1000 mm	6.0 mm
9494.7 m ~ 16306 m	鋼管 (SP)	900 mm	6.0 mm
16306 m ~ 17964.951 m	ダクタイル鋳鉄管 (DCIP)	600 mm	7.5 mm

図 8 計測施設概要

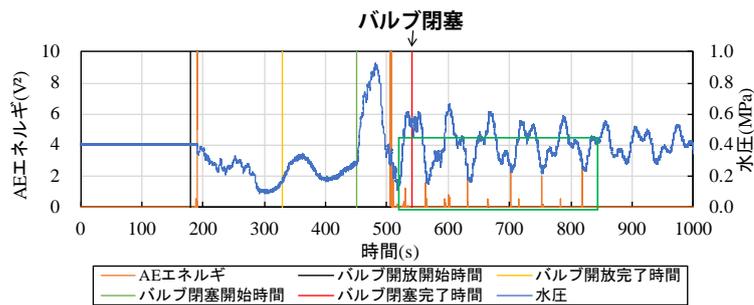


図 9 検出弾性波の時刻歴特性（水撃圧発生時，既存施設）

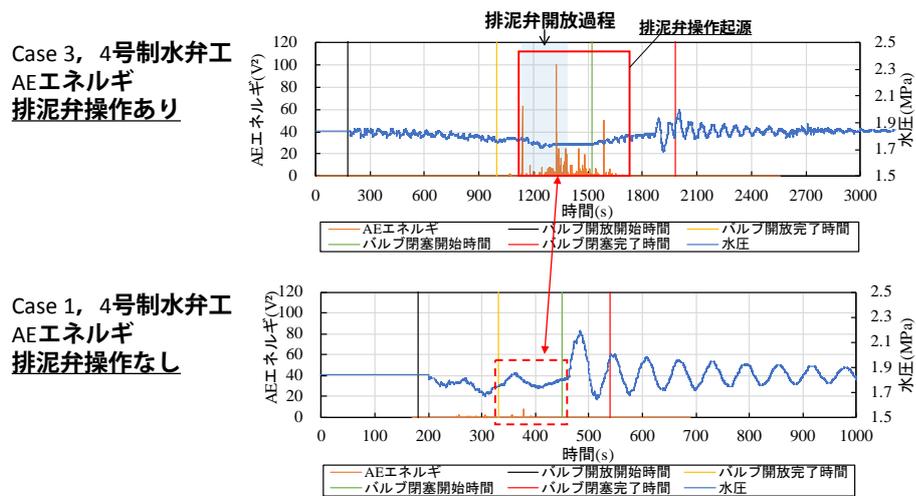


図 10 検出弾性波の時刻歴特性（モデル漏水発生時，既存施設）

### (3) 検討結果・考察

検討結果の一部を図 11、図 12 に示す。既存施設において発生させた水撃圧は、2018 年度助成事業と同様の規模と特性を確認した。AE 計測結果は、水撃圧発生時の圧力上昇時ないし下降時に顕著な AE エネルギーの放出が確認された（図 11）。同様の傾向は、2018 年度助成事業においても確認されていたが、本計測においてより明確な計測結果を得た。本計測では、2018 年度の結果を踏まえて計測時フィルターを詳細に検討した。このことから、配管内に発生する水撃圧やそれに起因する水理現象を詳細に同定するためには配管施設に適した弾性波計測条件の設定が不可欠であり、本計測では 2 カ年の助成事業を通してその詳細な検討が実施できたものと考えられる。

加えて、配管施設の老朽化が進行した場合、漏水現象によるシステムの不具合が顕在化する。本検討では、計測点近傍の排泥工からの排水を疑似漏水とし、AE 計測による漏水現象の同定を同時に実施した。検討の結果、疑似漏水発生点近傍以外の遠方部においても十分な計測精度が確保できることが確認された。このことから、検出波を指標に配管内水理現象や、水撃圧および漏水現象を高精度で検出可能であると推察される。

### 2-4. まとめ

本申請では、上下水道施設を対象に既存施設から発生する圧力波を検出し、管内で発生する「流れ場」と「材料損傷」の非破壊計測法を弾性波と画像解析の観点から構築することを目的とした。モデルパイプライン（2018 年申請事業）と既存施設での実証的検討（2017 年、2018 年申請事業）の結果、配管内に発生する圧力波を弾性波指標により高精度で検出できるとともに、画像解析による損傷同定が可能であることが明らかになった。提案手法により既存施設のマンホール部分を中心に施設の安全性診断が可能になるものと推察される。より効率的かつ情報蓄積を考慮した場合、本申請で開発した無線 AE システムなどの ICT に代表される情報通信技術の活用により、既存施設の状態評価精度の向上は可能であるものと推察される。

### 参考文献

- 1) 森充広, 藤原鉄朗, 齋藤豊, 増川晋, 渡嘉敷勝: 農業用水路変状調査システムの開発, 農業農村工学会論文集, 253, pp. 71~78 (2016)
- 2) 藤原鉄朗, 中山宣洋, 森充広, 森丈久, 渡嘉敷勝, 齋藤豊, 高岩庸博: 農業用水路トンネル・サイホンの不断水調査・診断技術の開発, ARIC 情報, 104, pp. 42~48 (2011)
- 3) 周藤将司, 緒方英彦, 兵頭正浩, 土居賢彦: コンクリート水利構造物を対象にした現地非破壊試験による一次共鳴振動数の測定方法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 295, pp. 69~75 (2015)
- 4) 周藤将司, 緒方英彦, 石神暁郎, 佐藤 智: 凍害劣化の生じたコンクリートの力学特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 303, pp. I\_291~I\_299 (2016)
- 5) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, (2008)
- 6) Tetsuya Suzuki and Yuma Shimamoto: Use of Acoustic Emission Parameter for Detection of Hydraulic Conditions in service Pipeline System, Progress in Acoustic Emission X I X, pp. 261-264 (2018)
- 7) Tetsuya Suzuki and Yuma Shimamoto: On-site damage evaluation of cracked irrigation infrastructure by acoustic emission and related non-destructive elastic wave method, Journal of PAWEES, (Accepted).
- 8) 鈴木哲也, 塩谷智基: AE 計測に基づく送配水パイプラインの非破壊モニタリング法の開発, 農業農村工学会誌, 86 (4), pp. 277-280 (2018)