

圧力変動データの同化に基づく管内漏水検知法の開発

Development of Pipe Leak Detection Method Based on Assimilation of Pressure Transient Data

○大山修蔵*, 浅田洋平**, 高木強治***
 ○Shuzo Oyama*, Yohei Asada**, Kyoji Takaki***

1. はじめに

管水路の漏水は、水自体の損失という経済的な問題だけでなく、地盤沈下、陥没穴、土壌汚染、水質汚染も引き起こす可能性があり、周囲環境、健康、安全性の問題も有している。よって漏水の存在と位置をできるだけ迅速かつ正確に検知することが重要であり、簡便かつ安価で信頼性の高い漏水検知法を開発することは非常に価値が高い。既存の手法と比較してより高精度かつ容易に漏水検知を行うことが期待される手法として、圧力変動を用いた漏水検知法が浅田ら(2018)によって提案された。この手法は、上流水槽—管路—下流端バルブ系を対象とし、バルブの急閉塞に伴う水撃作用により生じる管内の圧力変動を測定し、圧力変動における漏水シグナル（漏水による圧力低下）を目視で読み取ることで漏水検知を行う。しかし、この手法では漏水に起因しない圧力変化がノイズとなり、少量の漏水に対して目視による漏水検知が難しくなるという問題点がある。また、浅田ら(2020)は摩擦を無視した圧力波伝播理論と最適化手法を組み合わせた漏水検知法を開発したが、漏水量の推定に関して実測値と10オーダー以上の乖離がみられ実用的ではないという問題が存在する。本研究ではこれらの問題点を解決すべく、摩擦も考慮した管内の圧力変動数値シミュレーションを導入することで、より精緻な漏水位置と漏水量の推定を試みた。

2. 本手法の概要

本研究で提案する漏水検知法は、ランダムに与えられた漏水位置と漏水量を入力とする数値シミュレーションによって得られた圧力波形を、最適化手法を用いて実測の圧力変動データに同化させることで漏水位置と漏水量を推定するという流れで構成される。数値シミュレーションで用いた数値スキームを図1に示す。管路を複数の格子点で分割し、さらに各格子点を2つに分割しその間で漏水が発生していると仮定することで各格子点における漏水を表現した。水撃作用を起こす前（定常状態）における管路内の各地点の圧力および流量は、ダルシー・ワイズバッハの式、実測の上下流端の圧力、実測の初期圧力上昇量・圧力波伝播速度から導出できる下流端流量を用いて求めた。バルブ閉塞後（非定常状態）については、連続式と運動方程式の2式から導出される特性方

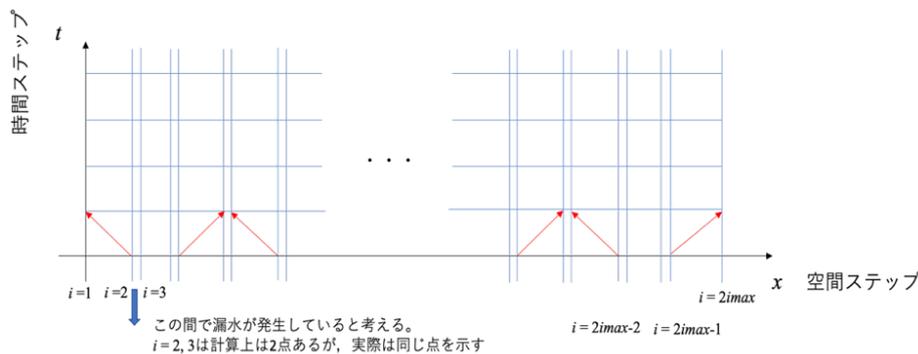


図1 数値シミュレーションにおける数値スキーム
 Fig. 1 Schemes in numerical simulation

所属：*東京大学大学院工学系研究科(School of Engineering, The University of Tokyo), **筑波大学生命環境系(Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba), ***東京大学大学院農学生命科学研究科(Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo)
 キーワード：管・開水路流れ, 安全性, 灌漑施設

程式を用いて、圧力の時間変化（圧力変動）を計算した。こうして導出された圧力変動を、粒子群最適化法を用いて実測データに同化させることで漏水位置と漏水量を推定した。

3. 実験的検証

本手法の検証として、茨城県つくば市の農研機構農村工学研究部門に設置された模型管路を用いて実験を行った。実験に用いた管路は全長 900m、管径 24.2mm、管厚 1.5mm のステンレス鋼管 (SUS304) であり、上流端からそれぞれ 150m、450m、750m の位置に漏水を模した開閉可能な漏水孔がある。管路の上流端には圧力タンクが設置されており、コンプレッサによって 30mH₂O まで加圧することができる。下流端バルブの直上流に圧力計を設置し、これをデータロガーに繋ぐことで圧力変動を計測した。加圧されたタンクから下流端に向かう流れが定常状態に達した後、バルブを急閉塞し水撃作用を起こした。漏水位置が上流端から 150m、450m、750m の場合について実験を行い、それぞれ Case1~3 とした。各ケースにおいては漏水量を 3 パターンに変化させており、小さい順に Case1-1~1-3 (漏水位置 150m の場合)、Case2-1~2-3 (漏水位置 450m の場合)、Case3-1~3-3 (漏水位置 750m の場合) とした。また、漏水がない場合を Case0 とした。

4. 結果および考察

計測した圧力変動の例として、Case2-1 と Case2-3 の結果を図 2 の橙色に示す。比較のため

漏水がない場合の圧力変動も青色で示した。漏水が大きい Case2-3 では漏水による圧力低下が目視でも読み取れるが、漏水が小さい Case2-1 では目視で圧力低下が読み取りにくいことがわかる。漏水検知結果を表 1 に示す。漏水位置の推定について、全ての Case で誤差が 2% を切る結果となり、誤差の大きさは平均して 0.55% 程度であった。漏水量の推定については全体で約 30% 以下の誤差であり、浅田ら (2020) の手法に比べて精度が向上したといえる。以上から本手法で提案した漏水検知手法は、従来の方法と比較して小漏水においても効率的かつ精度よく漏水位置を推定することができ、漏水量に関しても実用的に支障のないレベルで推定が可能であることが示された。

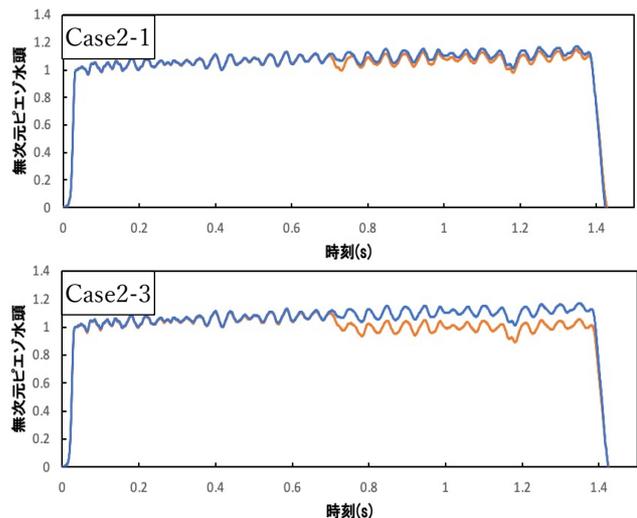


図 2 Case2-1, 2-3 の圧力変動
Fig. 2 Transient pressure in Case2-1 and 2-3

表 1 漏水検知結果
Table1 Leak detection result

Case	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
実測無次元漏水位置	0.167	0.167	0.167	0.5	0.5	0.5	0.833	0.833	0.833
計算無次元漏水位置	0.181	0.177	0.168	0.509	0.504	0.498	0.838	0.837	0.833
漏水位置誤差 (%)	1.42	1.08	0.14	0.94	0.40	-0.17	0.51	0.33	-0.00
実測漏水量 ($\times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$)	3.57	7.09	17.6	4.40	11.9	18.5	4.27	10.9	19.7
計算漏水量 ($\times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$)	3.77	5.39	15.0	4.21	13.0	20.4	4.75	13.0	23.8
漏水量誤差 (%)	5.6	-23.9	-15.0	-4.0	9.6	9.9	11.3	19.0	21.1

引用文献 浅田洋平, 木村匡臣, 安瀬地一作, 飯田俊彰, 久保成隆 (2018): 漏水中の管水路における水撃圧波形を利用した漏水位置と漏水量の推定 土木学会論文集 B1 (水工学), 74(4), I_613-I_618. 浅田洋平, 木村匡臣, 安瀬地一作, 飯田俊彰 (2020): 多点漏水や管固有の構造を有する管水路における圧力波形を利用した漏水検知法 土木学会論文集 B1 (水工学), 76(2), I_937-I_942.

謝辞 実験的検証にあたって農研機構農村工学研究部門の福重雄大研究員には多大なる協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。