

論文の内容の要旨

生物・環境工学専攻
平成 30 年度博士課程進学
氏名 浅田洋平
指導教員名 高木強治

論文題目 農業用管水路における圧力変動を利用した漏水検知に関する研究

第1章 研究の背景と対象

漏水は管路の経年劣化、腐食、第三者などによる盗水などによって発生しており (Zhang et al., 2015), 飲料水や灌漑水の不足といった大きな経済的な損失を引き起こしている。管水路の漏水は経済的な問題だけではなく、周囲環境、健康、安全性の問題も有している (Puust et al., 2010)。したがって、管水路の漏水はそ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る。日本の農業用管水路はその大半が高度経済成長期に整備されたものであり、老朽化が進んでいるため漏水・破損事故は年々増加の一途をたどっている (農村振興局, 2017)。管の漏水が原因となって突発的に発生する管の破裂事故は、道路や宅地の周辺環境に被害を与え、また管の修理費に莫大な費用がかかる。既存の漏水検知法はコストや労力の観点から管理のニーズを十分に満たしているとは言えない。以上から、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経済的に非常に価値が高く (Pudar and Liggett, 1992), 農業用管水路の維持管理や機能診断に対して早急に求められている。本研究では、他手法と比べて低コスト、少労力で漏水検知が実現できると期待されている (Meniconi et al., 2011), 管内の過渡現象 (水撃作用) を利用した漏水検知法 (Transient Test-Based Techniques, 以下 TTBTs と呼ぶ) を農業用管水路の漏水検知に利用することを提案する。

第2章 既往の研究とその問題点

既往の研究における TTBTs は主に 4 つの漏水検知法に分類される。4 つの方法の中でも、Transient reflection method (以下, TRM と呼ぶ) は最も適用が容易な方法であり、圧力波形における反射波のシグナルによって、漏水位置を推定することができる (Brunone, 1999)。しかし、管構造由来のノイズにより目視で反射波のシグナルを読みとれない場合がある。Transient damping method (TDM) は Wang et al. (2002) によって提案され、圧力波形の二つの固有周波数成分における各減衰率を利用した新しい漏水検知法である。この手法は大体の場合、漏水位置の解は複数存在し、漏水位置を一つに決定できないという問題点がある。TRM と TDM は圧力波形の中に含まれる二つの漏水に関する情報 (漏水部からの反射波のシグナル, 漏水による減衰) のうち一つの情報だけを使っている。一方で the system response function method (SRFM) (Lee et al., 2006) や the inverse transient method (ITM) (Brunone, 1999) のように二つの情報を使用する

方法も存在する。これらの手法は非常に有力な漏水検知法であるが、解析方法が複雑であり、他手法と比較して手間や時間がかかるため、迅速な漏水検知は難しく現場のニーズに合わない可能性がある。以上から本研究では、TRM と TDM の問題点を考慮に入れ、漏水部からの反射波のシグナルを利用した新たな漏水検知法と漏水による減衰を利用した新たな漏水検知法を開発する。

第3章 圧力変動を用いた新たな漏水検知法の開発とその理論

・漏水部からの反射波 (TRM) と最適化手法を組み合わせた漏水検知法

管内を伝播する圧力波が管構造の物理的变化によってその一部が反射するという事はよく知られており、漏水でも同様に圧力波は反射する。漏水部における圧力波 F_1 , 反射波 f_1 , 通過波 F_2 の関係式は以下の式で表すことができる。

$$f_1 = \frac{-ca / (2A\sqrt{2g(H_L - z_L)})}{1 + ca / (2A\sqrt{2g(H_L - z_L)})} F_1 \quad 3-(1) \quad F_2 = F_1 + f_1 = \frac{1}{1 + ca / (2A\sqrt{2g(H_L - z_L)})} F_1 \quad 3-(2)$$

c は圧力波伝播速度 (m/s), A は管断面積 (m^2), a は漏水孔の面積と流出係数の積 (m^2), H_L , z_L はそれぞれ漏水部におけるピエゾ水頭 (m) と位置水頭 (m), g は重力加速度 (m/s^2) である。3-(1), (2)式により漏水部からの反射波による圧力変化を解析的に求めることができる。この圧力変化の式と最適化手法を組み合わせることによって、目視ではなく、漏水なしと漏水ありの圧力波形の比較から自動的に漏水による圧力変化を捉え、漏水検知を行うアルゴリズムを作成した。本手法の数値シミュレーションによる検証を行ったところ、単一管路では問題なく漏水検知を行うことが確認できた。異なる管径を含む連結管路においても、管径変化点からの反射波が計測した圧力波形に到達する時間と圧力波形に与える影響を把握しておくことで同様に漏水検知が可能であることが明らかになった。

・時間領域の圧力波形の減衰を利用した漏水検知法

漏水による減衰と密接に関係していると思われる漏水部からのエネルギー減衰に着目した。管内圧力変動中における漏水によるエネルギー減衰は圧力波が漏水部を通過している時に起こることから、漏水によるエネルギー減衰は漏水部の圧力変化の二乗に比例する。また、漏水部の圧力変化は摩擦により Line Packing の影響を受け、圧力波通過後も圧力が上昇し続ける。よって、Line Packing の影響を考慮して漏水によるエネルギー減衰のモデル化を行い、そのエネルギー減衰から圧力波形の減衰式を求めた。その式を以下に示す。

$$\Delta H^* = \Delta H_0^* \exp\{-(R + R_L)t^*\} \quad 3-(3)$$

R は摩擦による減衰係数, R_L は漏水による減衰係数, ΔH^* は無次元圧力水頭変化, ΔH_0^* は無次元初期圧力水頭変化, t^* は時間 t を圧力波が管の全長を進む時間 L/c で無次元化した無次元時間である。 R_L は無次元漏水位置 x_L^* ($0 \leq x_L^* \leq 1$) と摩擦に関する二つのパラメーターで表せる。計測した漏水がない場合の圧力波形から R , 漏水がある場合の圧力波形から $R+R_L$ を求めることがで

きるので R_L を求めることができる。この計測による R_L と解析的に求めた R_L 式から漏水位置 x_L^* を推定する手法を開発した。この手法に対して数値シミュレーションによる検証を行ったところ、 R_L 式を構成する摩擦に関する二つのパラメーターは、管の諸量や流量条件によって決定される二つの無次元数で求めることができることが明らかになった。また、本手法はこの二つの無次元数の値によって適用性が大きく変化することがわかり、現場管路の諸量や流量条件を考慮に入れても十分に現場に適用できる手法であることが確認できた。

第4章 圧力変動を用いた新たな漏水検知法の実験的検証

・模型管路実験

3章で開発した二つの漏水検知法について、模型管路実験を行い、その有効性及び適用範囲を検証した。模型管路は全長 900 m、管径 24.2 mm、管厚 1.5 mm のステンレス鋼管 (SUS304) であり、約 25 m ごとに曲がり部を持つらせん構造を有している。上流端にポンプと加圧水槽 (最大圧 0.294 MPa) があり、下流端には流量を調整するための手動弁と圧力変動を起こすためのボール弁が設置されている。圧力計はボール弁直上流に設置した。各実験条件において、ボール弁を急閉塞することで圧力変動を発生させ、圧力波形を計測した。漏水部からの反射波 (TRM) と最適化手法を組み合わせた漏水検知法の検証では、漏水が 3 個の場合 (漏水位置が上流水槽から 750 m, 450 m, 150 m)、漏水が 2 個の場合 (漏水位置が上流水槽から 400 m, 450 m)、漏水が 1 個の場合 (漏水位置が上流水槽から 14 m) を設定した。すべての場合において、2%以下の誤差で漏水位置を検知することができた。計測した圧力波形にはらせん構造由来の高周波成分が見られた。この高周波成分やバルブ閉塞に多少の時間がかかることによって、誤差が生じていると考えられる。時間領域の圧力波形の減衰を利用した漏水検知法の検証では、漏水部を上流水槽から 750 m, 450 m, 150 m の位置に設定し、それぞれ 1 箇所ずつ漏水を発生させ実験を行った。すべてのケースにおいて 6%以下の誤差で漏水を検知することができ、本手法が漏水位置の絞り込みには十分に有効であることが示唆された。

・現場管路実験

新潟県佐渡市にある小倉幹線用水路を現場検証の対象地とし、時間領域の圧力波形の減衰を利用した漏水検知法について有効性の検証及び考察を行った。小倉幹線用水路は小倉調圧水槽 (上流水槽) ~管路~新保注水工 (下流端バルブ) からなる全長 17833.4 m (約 18 km) のパイプラインシステムである。このシステムの途中にはいくつかの分岐があるが、調査当日は皆川支線用水路へとつながる分岐だけが開いており常時 $4.60 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ の流量が皆川支線用水路へと流れていた。管路は鋼管及びダクタイル鋳鉄管で構成されている。皆川支線用水路へとつながる分岐は小倉調圧水槽から 10863.47 m 地点にあり、皆川支線用水路の全長は 2580.51 m、管種はダクタイル鋳鉄管である。新保注水工の制水弁を手動で操作した。初期の制水弁の開度を 1/2 回転、1 回転、3 回転の 3 パターンに設定し、それぞれ流況が安定した後、バルブ閉塞操作を開始した。また新保注水工の制水弁直上流で水圧計測を実施した。漏水がある場合の管内の圧力波形を計測するため、新保注水工から約 73 m 上流にある排泥工のバルブ (排泥弁) を開けることで、漏

水を模擬した。新保注水工の制水弁の初期開度 3 パターンすべての場合において、漏水を模擬する際は排泥弁の開度は 2 回転とし漏水量は 0.051 から 0.054 m³/s であった。開発した手法により漏水検知を行ったところ、全長に対する推定漏水位置の誤差は 0 から 0.2% となった。高精度で漏水検知を行うことができたが、数値シミュレーションによる考察の結果、分岐、管径変化点、粗度が圧力波形に与える影響を考慮して減衰モデルを改善していくことが重要であると示唆された。

第5章 結論

本研究で開発した二つの漏水検知法について、その特徴、有効性、問題点を以下に挙げる。

・漏水部からの反射波 (TRM) と最適化手法を組み合わせた漏水検知法は、漏水がない場合とある場合の圧力波形を比較するため、バルブ閉塞中の圧力変化を厳密に合わせるが必要不可欠である。多点漏水や管路構造による圧力波形の変化にも対応できる手法であり、今後、現場での適用試験を増やすことが当面の課題となる。

・時間領域の圧力波形の減衰を利用した漏水検知法は、現状では漏水が 1 点の場合のみの漏水検知法であるが、解析方法が簡便であり、漏水による圧力波形の減衰と漏水位置との関係を瞬時に求めることができるというメリットがある。一方で、漏水量の測定誤差が漏水位置の推定に大きく影響することがデメリットとして挙げられる。今後は、管径変化、分岐、粗度などの管路構造や特性による圧力波形への影響を考慮した減衰モデルの改善が課題となる。

・参考文献

- (1) 農村振興局 (2017) : 農業用水利施設におけるストックマネジメントの取組について
- (2) Brunone, B. (1999). Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes. *J. Water Resources Planning and Management* 125(5), pp. 302–306.
- (3) Lee, P.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Vi'tkovsky', J.P., & Liggett, J. (2006). Experimental verification of the frequency response method for pipeline leak detection. *J. Hydraulic Res.* 44(5), pp. 693–707.
- (4) Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., & Massari, C. (2011). Transient tests for locating and sizing illegal branches in pipe systems. *Journal of Hydroinformatics* 13(3), pp. 334–345.
- (5) Pudar, R.S., & Liggett, J.A. (1992). Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 118, pp. 1014–1031.
- (6) Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal* 7, pp. 25–45.
- (7) Wang, X.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Liggett, J.A., & Vi'tkovsky', J.P. (2002). Leak detection in pipeline systems using the damping of fluid transients. *J. Hydraulic Eng.* 128(7), pp. 697–711.
- (8) Zhang, T., Tan, Y., Zhang, X., & Zhao, J. (2015). A novel hybrid technique for leak detection and location in straight pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 35, pp. 157–168.