

水撃作用による管路内の圧力波形の減衰と漏水位置との関係について Relation between Damping of Pressure fluctuation by Water hammer and Leakage Point in Pipeline

○浅田洋平*、木村匡臣*、安瀬地一作**、飯田俊彰*、久保成隆*

○Asada Yohei*, Kimura Masaomi*, Azechi Issaku**, Iida Toshiaki*, and Kubo Naritaka*

1.はじめに 近年、農業用管水路の漏水破損事故は増加傾向¹⁾にあり、道路や宅地などの周辺地盤の陥没を引き起こすなど、社会に大きな損失をもたらしている。したがって、農業用管水路において、漏水を迅速かつ正確に検知する方法が求められている。既往の研究では、水撃作用による管路内の圧力波形の第1波において、漏水により圧力が低下する時間と圧力低下量を読み取ることで、漏水位置と漏水量を推定する方法を導出し、模型実験によってその方法の有効性が検証されている²⁾。しかしながら、前述の方法は漏水量が小さくなると、圧力波形の漏水変化と管の特性による高周波成分との判別が困難になり、漏水が検知できないという問題がある。一方で、管内の水撃作用による圧力波形において、漏水孔が大きくなるほど減衰が早く進むことは理論と実測において明らかであるが、漏水位置の違いにおける圧力波形の減衰の変化については未だに研究がなされていない。以上から、本研究では圧力波形の減衰と漏水位置との関係の解明を目的とし、管内の圧力波形の数値解析モデルを構築することで、同じ漏水量において漏水位置を変化させた場合の圧力波形の減衰の比較を行った。

2.数値解析モデル 基礎式は管路内の運動方程式(1)と連続式(2)を用いた。 x は流下方向距離、 v は流速、 H はピエゾ水頭(m)、 c は管内の圧力伝播速度(m/s)、 g は重力加速度(m/s²)、 h_f は単位長さ当たりの摩擦損失水頭を表す。 $v \ll c$ により、(1)式の左辺第2項と(2)式の左辺第3項を省略し、(1)± c ×(2)から常微分方程式を求めた。更に常微分方程式を差分することで特性直線法による数値解析を行った。また、摩擦損失水頭 h_f は(3)式のように定常の摩擦項 h_s と非定常の摩擦項 h_u の和で表し、非定常の摩擦項はZielke³⁾が示した平均流速の変化率と重み関数 $W(t)$ の畳み込み積分で求めた。 λ は摩擦損失係数、 D は管径(m)、 ν は動粘性係数(m²/s)、 t^* は積分定数を示している。また、管内の漏水は内部境界で表現し、(4)式のように、漏水量 Q_{leak} (m³/s)はオリフィスの流出の式によって表した。 aC_d は漏水による管路からの流出係数(m²)であり、漏水孔の大きさを表す指標である。1章で述べたとおり、漏水孔の大きさ aC_d が大きくなるほど、管内の圧力波形の減衰は早く進む。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + h_f = 0 \quad (1) \qquad \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$h_f = h_s + h_u = \frac{\lambda v |v|}{2gD} + \frac{16v}{gD^2} \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t^*} W(t-t^*) dt^* \quad (3) \qquad Q_{leak} = aC_d \sqrt{2gH} \quad (4)$$

3.数値解析モデルの検証 数値解析モデルにより得られた圧力波形を模型管路における圧力波形の実測値と比較することで、数値解析モデルの検証を行った。模型管路は農村工学研究部門(茨城県、つくば市)における全長900.43m、管外径27.2mm、管厚1.5mmのステンレス製管水路を用い

*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

**農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO

キーワード：流体力学一般、管・開水路流れ、水理学的波動

(Fig.1), 実測と理論式から管内の圧力伝播速度は 1,310m/s であることがわかっている。漏水を模した漏水孔を上流水槽から 150.34m, 450.33m, 750.34m の位置に設置し, 漏水をさせた状態で, 下流端にある電磁弁を急閉塞することで水撃作用を発生させ, 管内の圧力は電磁弁に近接する圧力計により計測した。Fig.2 に上流水槽から 750.34m 地点で漏水が発生している場合の圧力波形の実測値と数値解析による計算結果を示す。圧力波形の第 2 波以降は数値解析と実測値で位相にずれが生じるという結果になったが, 数値解析において実際の圧力波形を概ね再現できたと言える。

4. 圧力波形の減衰と漏水位置との関係について

2 章で説明した数値解析モデルを用いて, 漏水位置の違いによる圧力波形の減衰の影響を調査した。全長が 900m の管路を想定し, 漏水位置を上流端から 150m, 450m, 750m の 3 パターンに変化させたときの圧力波形と比較のために漏水がない場合の圧力波形を求めた。また, 各パターンにおいて, 漏水量, 漏水による管路からの流出係数 aC_d が同じになるように設定した。Fig.3 に漏水がない場合と漏水位置を変化させた場合の下流端における圧力波形の数値解析結果を示す。(流出係数 $aC_d = 0.0005(\text{m}^2)$, 漏水量 $Q_{leak} = 4.6 \times 10^{-6}(\text{m}^3/\text{s})$ で一定) なお, 各圧力波形の減衰を比較しやすくするため, グラフの縦軸はピエゾ水頭 h から初期圧力 h_0 を引いて, そのピエゾ水頭差を水撃作用による圧力上昇量 h_u で除した無次元化ピエゾ水頭 $(h - h_0)/h_u$ で表し, 横軸は水撃作用が発生してから時間を示している。グラフから漏水部が下流側にあるほど, 圧力波形の減衰は早く進んでいることがわかり, 最も上流側に近い 150m 地点漏水では, 漏水がない場合とほぼ同じように減衰していることが明らかになった。また, 各漏水パターンにおいて, 圧力波形の第 1 波における漏水による圧力低下量は同じであることが確認された。今後, 漏水位置と圧力波形の減衰との関係について, より詳細な調査を行うことで, 最終的に水張り試験法で漏水量が既知である場合に, 圧力波形の減衰から漏水位置を推定できることが期待される。

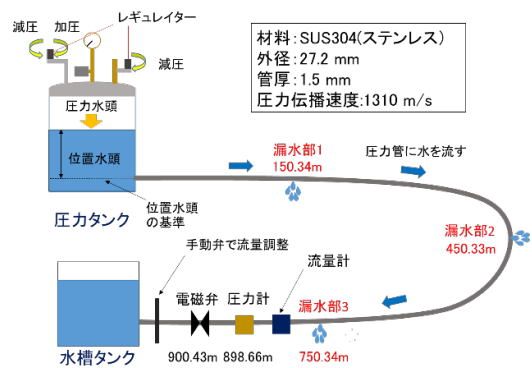


Fig.1 ステンレス製の実験用管路
Experimental stainless pipeline

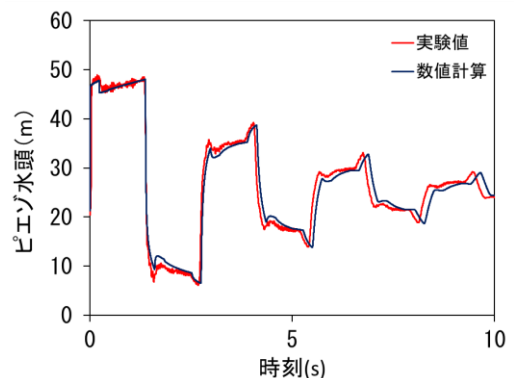


Fig.2 数値解析と実測値の圧力波形の比較
Comparison between numerical analysis and measurement results of pressure fluctuation

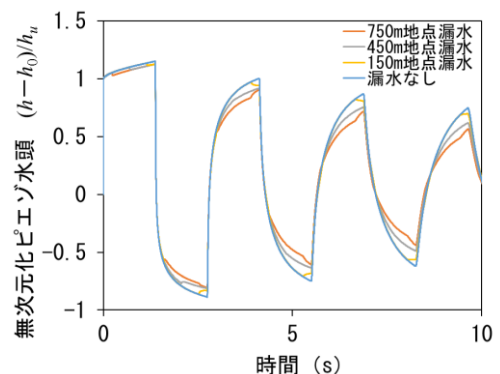


Fig.3 漏水位置の違いによる下流端の圧力波形の減衰の違い
Damping of pressure fluctuation in downstream end in case of no leakage, and leakage, 150, 450, 750m from upstream end

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：JST)の一部として実施された。

引用文献：1) 農村振興局 (2009)：「農業水利施設の機能保全の手引き」ーパイプライン編ーの策定について, pp.8-9. 2) 浅田ら(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)Vol.74, No.4, I_613-I_618. 3) Zielke, W.(1969)：Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, series D, Vol.91, No.4, pp.1-7.