

新潟大学農学部 学生会員 ○須田鼎
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 高橋悠斗
山口大学大学院創成科学研究科 正会員 萩原大生
新潟大学自然科学系（農学部） 正会員 鈴木哲也

1. はじめに

近年、農業用パイプラインは標準的な耐用年数の超過に伴い、漏水の発生件数が増加傾向にある。パイプラインの多くは地中に埋設されているため、漏水の発生を直ちに検出することは困難である。そのため、漏水の規模が小さい段階で漏水箇所を特定するための技術開発が急務となっている。

筆者らの既往研究¹⁾では、バルブの閉塞により発生させた水撃圧に伴う管材変形の計測から、漏水による水撃圧の減衰を管外面から評価し、漏水の検出を試みている。そこで本研究ではモデルパイプラインを使用し、実測値との比較を通じて、粘弾性を考慮した特性曲線法による水撃圧解析の再現性とその適用限界を明らかにすることを目的とする。

2. 実験および解析方法

実験を実施したパイプラインは、内径 100.8 mm、管厚 6.6 mm、管長 2.0 m の硬質塩化ビニル管をボルトでつなぎ合わせた長さ 64.8 m で構築した。上流端が自由水面を持つ水槽、下流端がボールバルブで構成されている。実験では、下流端のバルブを開放することで通水を開始し、上流水槽の水位が 1.0 m 低下した際にバルブを急閉塞し、管内に水撃圧を発生させた。水撃圧による管内の圧力変動を小型圧力センサを用いて計測した。水圧計測はバルブから約 0.4 m (P1) で実施した。実験は漏水なし (Case 1) とバルブから約 22.6 m 地点で漏水あり (Case 2) の 2 ケースに設定した。漏水孔の大きさは 5 mm とし、バルブ開放前に漏水を開始させた。管路内の圧力波の伝播特性を把握するため、同一のモデルパイプラインにおいて水圧計をバルブ近傍から 9 点 (P1～P9) に増設した多点計測実験を別途実施した。

パイプラインを両端自由の薄肉円筒と仮定し、管材の粘弾性変形を考慮した水撃方程式により水撃圧の数値シミュレーションを試みた²⁾。数値シミュレーションに用いた運動方程式および連続の式を以下に示す。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2gD} |V|V = 0, \quad (1)$$

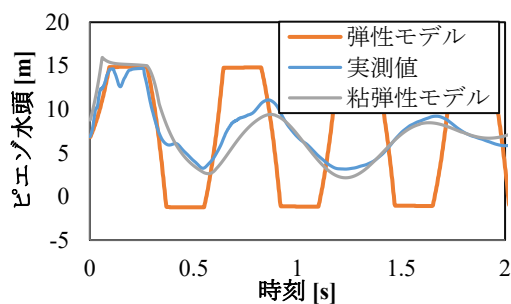
$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

ここで、 H : ピエゾ水頭 (m), V : 流速 (m/s), x : 距離 (m), t : 時間 (s), g : 重力加速度 (m/s²), f : 摩擦損失係数, D : 管径 (m), a : 圧力伝播速度 (m/s), ε_r は遅延ひずみである。Covas ら²⁾に倣い、遅延ひずみを含む項を粘弾性項とし特性曲線法に組み込み、式 (1) および式 (2) を離散化し特性曲線法より水撃圧を求めた。粘弾性は実測値とのキャリブレーションによりそのパラメータを推定した。本研究で実験を実施したモデルパイプラインでは、水撃圧以外に管の固有振動が発生している³⁾。そのため、実測値に対して信号処理を行い固有振動を抽出し、特性曲線法による計算値と合わせることで管の固有振動を考慮した。また、実測値とシミュレーション値の差異がどの程度かを示す指標として二乗平均平方根誤差 RMSE (m) を用いた。

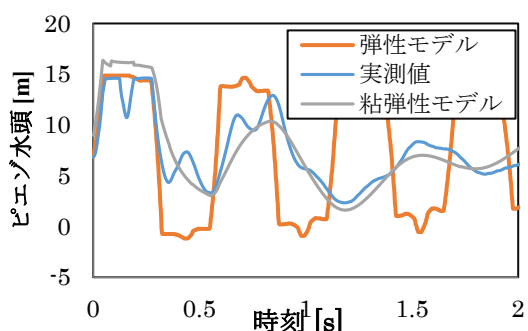
3. 結果および考察

計測した水撃圧およびシミュレーションによって求めた水撃圧を図-1、各ケースの RMSE 値を Table 1 に示す。非定常流況解析において粘弾性を考慮することで実測値との誤差が低減していることが確認された。また、管材の粘弾性に起因する水撃圧の減衰傾向が再現できていることが確認される。しかし、0.15 s 付近などに注目すると、漏水の有無にかかわらず、誤差が確認された。0.15 s 付近の誤差の要因を検討するため、多点計測実験の結果を図-2 に示す。バルブ近傍 (P1) から逆勾配手前の P5 までの低下は約 7% であったのに対し、逆勾配中の P5～P6 では水頭上昇量が約 1/3 まで減衰した。さらに頂上より上流側である P7～P9 では、水撃圧はほとんど伝播しなかった。また、多点計測実験の際、水撃を行った直後、水槽側から空気が排出されたことが視認された。これは、逆

勾配頂部付近に残留していた空気が水撃発生時に圧縮・膨張したものであると推察できる. これらから, P5～P6の逆勾配で管内空気あるいはパイプラインの構造によって水撃圧が減衰・反射が発生し, それを考慮していなかったためシミュレーションと誤差が発生したのではないかと考えられる.



(a) Case 1 漏水なし



(b) Case 2 バルブから 22.6 m で漏水

図-1 弾性モデルのみのものと粘弾性モデルと実測値のピエゾ水頭の変化

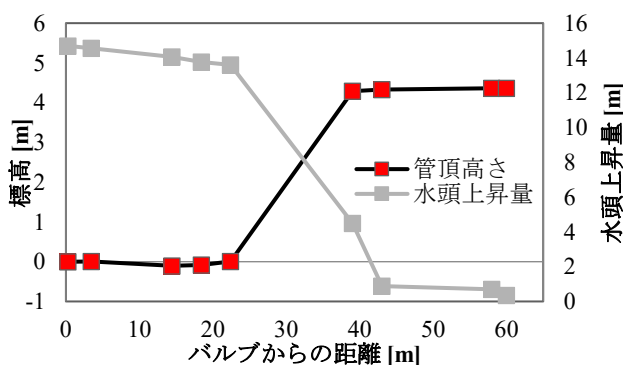


図-2 各水圧計のバルブからの距離と水頭上昇量

Table 1 各ケースの RMSE 値 (m)

	Case 1	Case 2
弾性モデル	6.4810	3.5620
粘弾性モデル	0.6418	0.8205

4. まとめ

本研究では, 水撃圧を用いたパイプラインの漏水検出法の基礎的な検討として, 特性曲線法に粘弾性項を考慮することによるシミュレーション精度の向上を試みた. 粘弾性の考慮により, RMSE は漏水なしで 1/10, 漏水ありで 1/4 に減少した. 一方, 逆勾配頂部の空気だまりやパイプラインの構造によるものと考えられる減衰は再現できず, これが適用限界である. 今後は, 水撃時に管内を移動する空気の位置・大きさなどを調べ, それをシミュレーションに組み込むことで漏水検出の基準波形の精度の向上を試みる.

参考文献

- 1) Tsubota, T., Hagiwara, T., Asada, Y. and Suzuki, T. (2024): Non-contact detection of water leakage in service pipeline by digital image correlation method with damping coefficients, *Advanced Experimental Mechanics*, **9**, 105-110.
- 2) Covas, D., Stoianov, I., Mano, J. F., Ramos, H., Graham, N. and Maksimovic, C. (2005): The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II—Model development, calibration and verification, *Journal of Hydraulic Research*, **43**(1), 56-70.
- 3) Takahashi, Y., Hagiwara, T., Tsubota, T., Suzuki, T., Kitano, H. and Honma, J. (2026): Non-contact detection of water hammer pressure damping in model pipeline with leakage using digital image correlation and continuous wavelet transform methods, *Journal of Hydraulic Engineering*, **152**(5), 06026005. DOI: 10.1061/JHEND8/HYENG-14696.