

モデルパイプラインに発生させた水撃圧の減衰特性に関する実証的検討

株式会社小野組 正会員 ○綿貫 隆広
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 高橋 悠斗
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、産業用パイプラインでは、耐用年数の超過や地盤の変動等、複数の要因によって、漏水などの突発事故が増加傾向にある。パイプラインの多くは地中埋設構造物であるため、漏水の発生を直ちに知ることは困難であり、漏水に伴う地表面の陥没などによって顕在化することが多い。そのため、漏水が軽微な段階で漏水箇所を特定する方法の開発が急務となっている。筆者らの既往研究¹⁾では、既設パイプラインを対象に、水撃圧の減衰指標から漏水位置の推定を試みている。また、モデルパイプラインを対象に、水撃圧の減衰指標の空間的な分布の把握を実施した²⁾。その結果、管路途中の計測地点で減衰率がばらつき、水撃圧の反射が示唆された。その原因として、発生させた水撃圧が小さかった可能性が考えられる。そこで本研究では、バルブ開度を変えて水撃圧の大きさを変化させ、反射への影響を水圧計測で検討する。

2. 実験および解析方法

本研究では、パイプライン内に発生させた水撃圧の漏水による減衰をモデルパイプラインを用いて評価した。モデルパイプラインは、内径 100.8 mm、管厚 6.6 mm の硬質塩化ビニル管で構築した。全長約 65 m、高低差約 7.8 m であり、上流端に水槽、下流端にバルブを設置した。バルブ開度 16.9° で、水槽水位が 1.1 m (GL7.8 m) より放流開始し 0.10 m (GL6.8 m) になった際にバルブを急閉塞させ、管内に水撃圧を発生させた。実験のケースは漏水の有無・位置で分類し、漏水なし (Case 1) および漏水あり、バルブから 1.45 m 地点 (Case 2)・16.45 m 地点 (Case 3)・20.45 m 地点 (Case 4)・41.05 m 地点 (Case 5)・60.02 m 地点 (Case 6) の 6 ケース実施した。水圧計は基本的に漏水箇所の前後 2.0 m の地点の管体上部に小型圧力センサ (HLV-300KPa および HLV-100KP, センシズ社製) を設置 (計 9 基) することで計測を行った。水圧計の計測間隔を 1000 Hz に設定した。漏水は直径 5 mm の円形の漏水孔を用い、放流開始前に開放するこ

とで漏水を発生させた。加えて、漏水なしの条件でバルブ開度を 10°, 20°, 30°, 40° に変え、開度ごとに 3 回ずつ計測を実施した。

水撃圧の伝播速度の理論値を次式により算出し、水撃圧の周波数を算出した。

$$a = \sqrt{\frac{1}{\gamma \left(\frac{1}{E_w} + \frac{2R}{eE_p} \right)}}, \quad (1)$$

ここで、 a : 圧力伝播速度 (m/s), γ : 水の単位体積重量 (kN/m³), g : 重力加速度 (m/s²), E_w : 水の体積弾性係数 (N/m²), R : 内半径 (m), e : 管厚 (m), E_p : 縦弾性係数 (N/m²) である。計測により得られた水圧データに対し、高速フーリエ変換 (FFT) を行い、水撃圧の 1 次成分の周波数を特定した。特定した周波数帯の信号をバンドパスフィルタとよばれる信号処理により抽出した。抽出した水撃圧 1 次成分の時系列データの減衰特性を以下の式を用いて評価した³⁾。

$$p(t) = ae^{-\sigma t}, \quad (2)$$

ここで、 p : 水圧 (kPa), a : 初期振幅, σ : 減衰率である。

3. 結果および考察

バルブから 22.45 m 上流の水圧計 5 で計測した水圧データにおける、水撃圧発生時の時系列グラフを図-1 に示す。漏水の有無や漏水箇所による水撃圧の圧力伝播速度の大きな変化は確認されなかった。高低差がほぼない水圧計 1~5 における水撃圧の立ち上がり時刻を距離に対して回帰すると、圧力伝播速度は約 463 m/s であり、式 (1) による理論値の約 468 m/s とほぼ一致した。漏水の有無での比較により、漏水の存在により水撃圧の減衰が大きくなることが確認された。バルブ付近で漏水を発生させた Case 2 では水撃圧の減衰が大きかったのに対し、バルブから約 60 m 地点で漏水を発生させた Case 6 では水撃圧の減衰が Case 1 と同程度であった。各水圧計における水撃圧の 1 次成分の減衰率を図-2 に示す。すべての計測地点において、漏水により水撃圧の減衰率が増加していること

が確認された。水撃圧発生地点であるバルブから漏水地点までの距離が遠いほど水撃圧の減衰は小さいという結果であった。高低差がほぼない水圧計1から水圧計5で計測した水撃圧の減衰率は同程度のものであったが、水圧計7で計測した減衰率は値がケースによりばらついていることが確認された。これは水撃圧がパイプラインの途中で反射したためと考えられる。FFTの結果、水撃圧に由来する振幅スペクトルのピークは2.3~2.8 Hzに確認され、管路延長65 mと圧力伝播速度の理論値から算出される周波数(1.80 Hz)より高かった。ピーク周波数(2.56 Hz)と圧力伝播速度の実測値から、反射源はバルブから約45 m地点にあると推定される。反射の原因として、バルブ開度16.9°で発生させた水撃圧が小さかった可能性がある。

バルブ開度を10°、20°、30°、40°に変えて計測した水圧の時系列グラフを図-3に示す。水圧計5における最大水圧は、10°で93 kPa、20°で247 kPa、30°で349 kPa、40°で288 kPaであった。水撃圧発生後2秒間の最大値と最小値の差を振幅とし、水圧計5に対する振幅の比を求めた。水圧計7における振幅比は、10~30°で0.1~0.2、40°で0.3~0.4であった。以上より、水撃圧を大きくしても、水撃圧がパイプラインの途中で小さくなる傾向は変わらなかった。したがって、反射の原因は水撃圧の大きさではないと考えられる。その他の要因として、曲がり管の多い管路形状と、管体が固定されていないことに伴う流体構造連成が挙げられる。

4. おわりに

本研究では、モデルパイプラインを用いて、管内に発生させた水撃圧を水圧計を用いて計測し、漏水の有無および漏水位置の変化による減衰特性の評価を試みた。設置したすべての水圧計において、漏水の存在による水撃圧の減衰率の増加が確認された。減衰率は漏水地点が水撃圧の発生地点に近いほど大きいという結果となった。以上の結果より、水撃圧を援用することでパイプラインに発生する漏水を非破壊検出できる可能性が示唆された。また、バルブ開度を10~40°に変えても、水撃圧がパイプラインの途中で小さくなる傾向は変わらなかった。今後は、管路形状および管の固定条件が水撃圧の反射に及ぼす影響を検討する予定である。

参考文献

1) 高橋悠斗, 坪田到馬, 萩原大生, 鈴木哲也: 水撃圧の減衰に着目したひずみ計測によるポンプ圧送式パイプライン

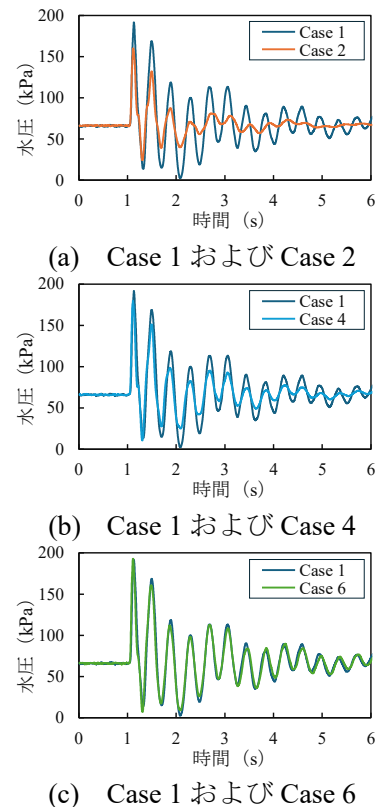


図-1 水撃圧発生時の水圧の時系列グラフ

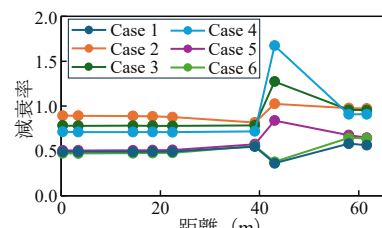


図-2 各水圧計における水撃圧1次成分の減衰率

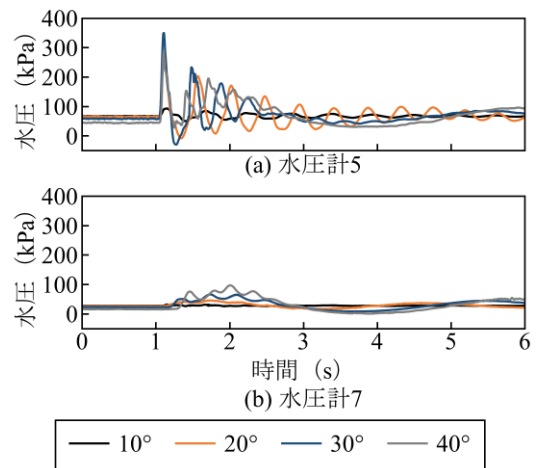


図-3 バルブ開度ごとの水圧の時系列グラフ

の漏水の非破壊検出, 土木学会論文集, 82 巻, 15 号, 25-15035, 2026.

- 2) 綿貫隆広, 高橋悠斗, 鈴木哲也: 漏水に伴うモデルパイプラインに発生した水撃圧の減衰特性の検出, 第 53 回土木学会関東支部技術研究発表会講演要旨集, 2026.
- 3) Capponi, C., Meniconi, S., Lee, P. J., Brunone, B., and Cifrodelli, M.: Time-domain analysis of laboratory experiments on the transient pressure damping in a leaky polymeric pipe, *Water Resources Management*, Vol. 34, pp. 501-514, 2020.