

農業用パイプラインに発生する弾性波による非破壊安全性診断 - 気液二相流を事例に -

Use of Elastic Waves for Safety Assessment of an Agricultural Pipeline - A Case Study of Gas-Liquid Flow Effects -

○鈴木哲也*・樽屋啓之**・中達雄**

Tetsuya SUZUKI*, Hiroyuki TARUYA and Tatsuo NAKA

1. はじめに

農業水利システムの効率的な運用や適切な維持管理には、かんがい用水の送配水状況を詳細に評価する必要がある。一般的に、農業水利施設の設計計画では、定常状態あるいは非定常状態を基礎とする解析的検討が行われ、送配水システムの最適化が試みられている。長期供用下の農業用パイプラインでは、混相流の発生など設計段階では十分に明らかにされていない各種流動形態が発生し、事故を誘発する。

筆者らは、配管内流況に起因する弾性波を受動的に検出し、そのエネルギー値および周波数特性からパイプライン内部の流動形態の評価法を開発している^{1), 2)}。流動形態の同定を踏まえて、パイプラインの充水試験における非破壊安全性診断法を提案している^{3), 4)}。一般的に、パイプラインにおいて補修工や補強工が行われる際には管内が空虚となる。その際、配管材は内水圧が作用している段階から応力が解放された状態となる。充水試験は、このような応力解放状態から再度、内水圧を段階的に作用させ、漏水事故等の不具合の発生の有無を評価する照査試験である。従来、目視観察や作用水圧により対象とするパイプラインの水密性能が評価されてきたが、安全性評価指標として妥当ではなく、新たな判断指標が求められているのが現状である。筆者らは、二成分二相流状態で発生する弾性波に着目し、管内流況と検出波のエネルギー値を用いた定量評価指標を提案している⁴⁾。

本報では、パイプラインから発生する弾性波に関する非破壊検査分野での議論を概観し、農業水利システムの安全性診断への弾性波計測の適用と技術課題について気液二相流を事例に考察する。

2. パイプラインにおける弾性波発生機構とその同定に関する技術課題

内水圧が作用するパイプラインにおいて発生する弾性波には、損失水頭に代表されるエネルギー損失や気液二相流に起因する気泡運動、水激圧などがある。いずれの現象も放出されたエネルギーが弾性波となり、検出することが可能となる。弾性波の検出方法には、低周波数領域の現象には加速度計が、20kHzを超える超音波領域の現象にはAE (Acoustic Emission) センサが用いられるが、その特性や精度は計測方法、管材および伝搬過程に影響を受ける。

一般的に管材中を伝搬してきた弾性波の発生位置の同定には相互相関関数を用いる事例は多いが、伝搬した波動の特性は発生源の特徴に加えて、材料を含む配管構造の影響を受ける。漏水現象に代表される孔食部位に発生したジェット流起源の弾性波は、連続型波形であることは共通であるが、その周波数特性やエネルギー値は検出する際の内水圧の影響を受ける⁵⁾。漏水波動に関する既往の研究は、上水道分野において数多く行われているが、農業水利分野特有の議論としては上水道と比較して大規模かつ高内水圧を受ける既設パイプラインの安全性を充水試験などにおいて非破壊診断するた

* 新潟大学自然科学系（農学部）Faculty of Agriculture, Niigata University

** (独) 農研機構・農村工学研究所 National Institute for Rural Engineering

キーワード 農業用パイプライン, 水理特性, 弾性波計測, 非破壊検査, AE/AU

めの方法論を構築にあると考えられる。パイプラインの安全性能は、前述のとおり混相流状態で低下する。そこで次節において気液二相流を事例にパイプラインの非破壊安全性診について考察する。

3. 非破壊安全性診断

-気液二相流の流動形態と配管振動問題-

気液二相流の流動特性は、配管振動と密接に関連しており、気相の流動形態によりその特性が異なる。流動形態の判定には、Grant やベーカー線図が主に用いられ、ボイド率の上昇により気泡流から間欠流（スラグ流，フロス流，環状流など）、噴霧流と流動形態が遷移する。気液二相流によるパイプラインの振動現象は、流動形態により励起力の特性が異なる。振動現象は、渦励起振動，流体弾性振動およびランダム振動に分類され，空気混入現象に加えて，混入気泡の浮力と送流水の流速の関係に起因するブローバック現象が主な振動の発生原因となる。弾性波法による気液二相流の特性評価には，気泡運動起源の弾性波の発生機構と発生した弾性波の伝播挙動を理解する必要がある。気液二相流における弾性波は，気泡の衝突や破裂といった気泡運動に起因するエネルギー解放過程において発生する。検出波の周波数特性は，Rayleigh-Plesset 式により評価することが可能である。本式は，静水中の気泡の半径 R の時間変化を記述する Navier-Stokes 式から導かれる運動方程式である。気液二相流において検出される弾性波の周波数特性は気泡径に依存し，一般的に気泡径と弾性波の検出周波数との関係は下式により評価することができる（式(1)）。本式は気泡半径以外の数値を一定と仮定した場合，検出波の周波数は気泡径に依存し，径が小さいほど周波数は高くなる傾向を示す。

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho} - \frac{2\sigma}{\rho R}} \quad (1)$$

ここで， f ：周波数， R ：気泡半径， γ ：比熱

比， P_0 ：気体圧力， ρ ：液体密度， σ ：表面張力係数 である。

筆者らのモデルパイプライン（管径 ϕ 100mm，総延長 $L \approx 13\text{m}$ ；透明アクリル管）による実験的検討の結果¹⁾，気液二相流の流動形態は AE パラメータや超音波を利用した AU (Acousto-Ultrasonic) 法⁶⁾により同定可能であることが明らかになった。そのことにより充水試験に代表される送配水パイプラインの応力状態が水理現象により大きく変化する状態の安全性診断は，配管内から発生する弾性波を検出することにより評価可能であると推察される。

引用文献

- 1) 鈴木哲也，中達雄，樽屋啓之，田中良和，青木正雄：AE 法を用いたオープン型パイプラインに発生する気液二相流の特性評価，構造工学論文集，56A，pp. 665-670，2010.
- 2) 鈴木哲也，久保成隆，飯田俊彰：パイプラインに発生した圧力波の非破壊検出に関する研究，農業農村工学会論文集，287，pp. 95-103，2013.
- 3) 鈴木哲也，中達雄，樽屋啓之，青木正雄：弾性波検出による補修パイプラインの水密性照査法の開発，農業農村工学会誌，78(1)，pp. 3-6，2010.
- 4) 鈴木哲也：送水パイプラインの事故後復旧過程の非破壊安全性診断に関する研究，土木学会論文集 F6 (安全問題)，70 (2)，pp. I_143-I_148，2014.
- 5) 鈴木哲也：農業用パイプラインにおける漏水波特性へ及ぼす内水圧の影響に関する実証的研究，農業農村工学会論文集，270，pp. 101-102，2010.
- 6) 鈴木哲也：AU 法を用いた農業用パイプラインに発生する気液二相流の特性評価，平成 23 年度農業農村工学会講演会講演要旨集，CD-R，2011.