弾性波計測による損傷パイプラインの水密性評価に関する研究

鈴木 哲也¹・久保 成隆²・飯田 俊彰³

¹正会員 新潟大学准教授 自然科学系(農学部) (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

E-mail: suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

² 東京大学大学院教授 農学生命科学研究科 (〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: anakubo@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

³ 東京大学大学院准教授 農学生命科学研究科 (〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: atiida@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

水密性能が低下したパイプラインでは、管材損傷の蓄積に伴い漏水事故が頻発する。従来、パイプラインの通水試験では、充水過程において漏水事故を検出・評価することは困難であった。このことから、近年、パイプラインの水密性能照査法の開発が急務な技術的課題となっている。本報では、弾性波を受動的に検出するAE (Acoustic Emission) 法を用いてモデルパイプラインと既設構造物を対象に充水過程の水密性能照査を試みた結果を報告する。検討の結果、AE発生頻度やエネルギー値を用いることによりパイプラインの水密性能を評価できる可能性が確認された。

Key Words : pipeline, water-tightness, water-leak, repair work, AE method, AE parameter

1. はじめに

上水道や産業用水に代表される内水圧を利用した送配水パイプラインでは、材料損傷の蓄積により漏水事故が発生し、周辺環境へ多大な影響を及ぼす。送配水パイプラインの特徴は、水理条件と管材を含めた配管構造が合理的に設計されることにより、地盤標高に影響されない路線選定や末端水供給の自由度が高まるなど、開水路とは異なる構造的利点を有していることにある。しかし、長大な水理ユニットの一体性が確保されることに伴い、既存システムの老朽化による漏水事故や末端での圧力低下の影響範囲が拡大する。既存施設では、土中に埋設されている構造的な特徴から、十分に維持管理されていない施設が散見されるのが現状である。維持管理における一般的な論点は、このような背景から補修・補強工を中心とした施工技術に関する議論が多く、施設の水理特性からの安全性評価に関する議論は少ない。

筆者らは、パイプラインの水理現象から発生する弾性波をAE (Acoustic Emission) 法により検出し、漏水現象¹⁾や混相流²⁾、圧力波³⁾の同定を試みている。既往の研究により、水理現象とAEパラメータとの密接な関連が示唆されており、弾性波特性と管内流況との関連から水密性能を評価できる可能性を確認している。本論では、

内水圧作用下のパイプラインにおいて欠損部からの漏水の有無を水密性能と定義し、漏水の有無を確認することを水密性能照査として論述する。

本報では、上水道や産業用水に多用されている送配水パイプラインを対象に、通水試験時に発生する弾性波をAE法により検出し、水密性能照査を試みた結果を報告する。実験的検討には、モデルパイプラインと実構造物を用いた。計測値は、AEパラメータであるAE発生頻度とエネルギーを用い、通水試験時の充水過程を定量的に評価した。

2. パイプラインの損傷実態と水密性能照査

既設パイプラインに発生する漏水事故原因は、管材質や配管構造に起因するものと、不等沈下など埋設環境に影響されるものに分けることができる。管材の材質や配管構造に起因する漏水事故には、鋼管の場合、マクロセル腐食による孔食の影響が指摘されている⁷⁾。コンクリート系配管では、継手ゴム輪の劣化やコンクリート部材の脆性破壊など、鋼管とは異なる原因により漏水事故が誘発される⁸⁾。一般的に管材の損傷度評価には、弾性波の伝搬特性⁹⁾や破壊挙動¹⁰⁾、強度特性などが指標値として用いられている。現状では、これらの非破壊ないし破

壊検査が行われた後に補修・補強工が施されている。しかし、広範囲にシステムが構築されたパイプラインでは、構造材料の損傷度評価に加えて、水密性を含めた水理機能の機能診断が不可欠である^{11,12}。同様の指摘は、ガス、や電力などライフライン構造物を対象にした既往の研究においても言及されており、各々の構造物において、それらの特性を考慮した機能診断法が提案されている¹³。

送配水パイプラインの場合、老朽化が進行した既存施設では、補修・補強工が行われた後に通水試験による水密性照査が行われている。通水試験とは、補修工事等が完了し、空水状態のパイプライン施設へ下流部から段階的に充水にする試験である。主に配管の水密性や空気弁の作動状況を確認する目的で行われる。充水過程において、空水から満水に至る際に気液二相流が発生する。配管内空気の排除が不十分な場合、漏水事故の誘引となる。現状では、センサを用いた非破壊センシングではなく、写真-1に示す技術者による目視観察（付帯施設からの漏水の有無）や圧力計の読み値（管内水圧）により判断されることが多い。従来法の問題点は、指標値である管内水圧ではリアルタイムによる水密性照査が困難な点にあり、試験実施施設が安全性であることを前提に充水されている意味合いが強いと言える。パイプラインの安全性を低下させる主な原因には、配管内への空気混入が圧力変動を増幅させるとともに脈動を誘発し、その結果として管材の耐久性低下と漏水事故を引き起こすことにある。通水試験など、排気を伴う充水過程では管内が空虚な状態から混相流を経て満流へと変化することから、リアルタイムでの水密性能に関するモニタリングが不可欠であるが、現状では十分に行われていない¹³。

筆者らは、以上のような技術的課題を踏まえて通水試験の際に発生する水理現象起源の弾性波に着目し、その特性から管内流況と安全性（水密性能）を診断する非破壊検査法の開発を試みた。

3. 弾性波法に基づくパイプライン水密性能照査

(1) 検討手法の特徴

本検討手法の特徴は、配管内から発生する水理現象起源の弾性波を受動的に検出し、その特性から漏水の有無と充水過程を評価することにある。弾性波計測にはAE法を用いた。評価指標は、既往の研究からデータベース化された通水シグナル（弾性波）とそのAEパラメータ（周波数、エネルギー、最大振幅値）である。本研究では、モデルパイプラインと既設構造物での試験結果を踏まえて照査法を提案する。モデルパイプラインでは、充水量を制御した条件下でAE発生挙動を評価した。既設構造物では、新設の際に行われる通水試験においてAE計測を行い、AEパラメータ挙動から実構造物における検討

写真-1 従来の通水試験状況

図-1 パイプライン水密性能照査の流れ

図-2 定常流下で検出される弾性波

図-3 漏水波（計測条件：内水圧 0.8MPa）

手法の有効性を検証した。

(2) パイプライン水密性能照査法

提案手法は、通水試験の一連の充水過程を4段階に区分し、各段階で検出される弾性波の特性から漏水の有無と充水過程の水理条件を評価するものである(図-1)。弾性波の検出は、実構造物での応用が可能であると考えられる付帯工での計測を模擬し、直管部(図-1:センサ1)と空気弁工(図-1:センサ2)の2か所で行うことを前提に評価法が構築されている。計測は、空虚な状態から開始される(図-1:Step 1)。その際、弾性波は検出されない。充水が開始され、計測地点のセンサ位置に水位が観測される時点でセンサ1において弾性波(AE)が検出される(図-1:Step 2)。流況は層状分離流の状態である。直管部において満流状態となった場合、漏水が無い部位ではセンサ1のAE発生頻度は低下傾向を示す(図-1:Case 1)。それに対して、漏水が発生している部位ではAEの頻発が継続する(図-1:Case 2)。センサ2の反応は、Step 3以降に確認され、管内水位の上昇に伴い空気弁浮球が固定されるまでAEが検出される(図-1:Step 4)。各段階で検出される弾性波は、配管内の水理現象により大きく異なる。本論では次節に検出波特性を詳述する。

(3) 検出波特性

本節では後述するモデルパイプライン試験と実構造物より検出されたAE波形の特徴を概説する。

定常状態のモデルパイプラインでは、水理現象起源のAE(弾性波)は一般的に観測されなかった。計測時のしきい値を下げることにより通水音(図-2)は検出されたが、環境ノイズを同時に計測するためフィルタリング等の検出精度の改善が必要であることが示唆された。検出波形は連続型波形であった。一般的に社会基盤施設の破壊現象において発生する弾性波は、突発型波形である。突発型波形の場合、検出波の初動が明確であり最大振幅値までの立ち上がり時間が短い特徴を有する。連続型波形では、検出波の振幅値がほぼ一定に保たれているが、初動が不明瞭である特徴を有する。弾性波の発生位置の同定は、突発型波形の場合、初動を読み取りに基づく複数のセンサ間の到達時間差から評価することができる。漏水現象などで確認される連続型波形では、初動の検出は困難であり、検出波間の相互相関から伝搬時間差を評価し、評価値と波動伝播速度から漏水位置の検出が理論的な観点から可能となる¹⁴⁾。実際に実構造物において検出された漏水波は、内水圧により周波数特性を変化させた。図-3は、内水圧0.8MPaにおいて漏水点近傍で検出された弾性波である。同一部位で内水圧を1.25%の0.01MPaまで低下させた際の検出波を図-4に示す。両検出波を比

図-4 漏水波(計測条件:内水圧 0.01MPa)

図-5 気泡流状態で検出される弾性波

図-6 平均周波数と AE エネルギーの関係(直管部)⁴⁾

図-7 平均周波数と AE エネルギーの関係(空気弁)⁴⁾

較すると、明らかに波形形状が異なり、周波数特性やRMS電圧など内水圧の低下による相違が顕著となった。

パイプラインの水理現象において突発型波形が確認されるのは水撃圧現象や気液二相流現象である。水撃圧現象では、バルブの急閉などに伴う圧力波が波動現象として検出される。気液二相流現象では、気泡挙動に起因する突発型波形が検出された(図-5)。検出された弾性波の定量的評価には、ピーク周波数やRMS電圧、最大振幅値などが用いられている。これらの評価値は、検出部位により影響を受ける。一例を図-6および図-7に示す⁴⁾。図-6は、モデルパイプライン(管径 $\phi 100\text{mm}$ 、内水圧条件)において流動形態の異なる気液二相流をAE法により同定した結果である。計測部位は、直管部である。満流状態では 20kHz 以下の周波数帯域に検出波が確認できるのに対して、混相流状態では $20\text{kHz}\sim 50\text{kHz}$ に周波数帯域の上昇が確認された。エネルギー値は流動形態により異なり、満流<層状流<プラグ流<気泡流の順に評価値の上昇が確認された。同一の水理条件を空気弁において計測した結果、直管部とは異なり、流動形態による明瞭な相違は確認されなかった(図-7)。

これらのことから、送配水パイプラインでは、計測対象とする水理現象により計測部位を考慮することが必要であるものと考えられる。既設構造物の場合、センサの設置が容易な部位は空気弁などの付帯工であるが、埋設部位での計測にはウェーブガイドを用いた補完的計測の必要性は高いと考えられる。

4. モデルパイプライン試験

以上の検討を踏まえて、本稿では筆者らにより実施したモデルパイプライン試験と実構造物での通水試験における水密性照査の検証結果を報告する。

(1) 試験条件

モデルパイプラインは、管径 $\phi 100\text{mm}$ 、総延長 $L=13\text{m}$ の透明アクリル管を用いて実験室内に構築した。配管構造は水平とした。配管中央部には、空気弁工を設置し、配管内空気を排出した。設定充水量は 3.6l/s である。試験は、空虚な状態から満水後、管内空気が空気弁工から完全に排出されるまで行った。検討ケースは、漏水が無く安全な状態(Case 1)と漏水現象($Q_{\text{leak}}=38.3\text{ ml/s}$)が確認される場合(Case 2)の2ケースである。配管内から発生する弾性波はAE法を用いて検出した。AE計測は直管部2か所と空気弁工1ヶ所、合計3ヶ所で行った。計測条件は、しきい値 45dB 、プリアンプとメインアンプで 60dB の増幅を行った。センサは 30kHz 共振型を用いた。AE法により検出した弾性波は、AEパラメータにより定量的評価を試みた。本報では、使用したパラメータの中

図-8 AE発生挙動 (Case 1)

図-9 AE発生挙動 (Case 2)

写真-2 6号制水弁でのAE計測状況

写真-3 充水中に発生した空気弁下部での漏水事故

でも特にAEエネルギーに関する検討結果を報告する。なお、AEエネルギーとは、検出波の振幅値が10Vのピーク値を1ms継続した時に1,000カウントエネルギーを持つと定義された相対値である。

(2) 結果および考察

a) 安全な状態での充水過程 (Case 1)

漏水が無く安全な状態での充水過程をAE計測した結果を図-8に示す。図中のCh1~3は、直管部(Ch1)、空気弁工(Ch2)および空気弁後方の直管部(Ch3)を示す。なお、本ケースではCh3はCh1と同一条件である。配管内流況は、充水開始後80秒で直管部が満流となり、90秒で空気弁浮球が固定された。検出波のAEエネルギーは、Ch1およびCh3が満流になる約90秒までエネルギー値を上昇させ、その後緩やかに下降した。それに対して、Ch2は空気弁工内を水位が上昇する80秒から90秒の間に検出波のAEエネルギーを急上昇させ、空気弁浮球が固定された100秒以降、急速に低下した。これは、空気弁内の排気と浮球挙動がAEパラメータに影響しているものと推察された。

b) 漏水が発生している状態での充水過程 (Case 2)

漏水が発生している状態での充水過程についてAE計測を行った結果を図-9に示す。Ch1とCh2は図-8と同様のAE発生挙動であるが、Ch3(漏水点近傍に設置されたAEセンサ)では80秒以降AEエネルギーの低下は認められなかった。これは、センサが漏水波をとらえることにより、継続的なAEの検出が確認できたものと考えられる。Case1およびCase2の検討から、図-1に示す水密性照査の流れに従い、パイプラインの充水過程を非破壊かつ定量的に評価できる可能性が明らかになったものと考えられる。

そこで、本研究では既設パイプラインの通水試験を対象にAE計測を導入し、提案手法により水密性照査を行うことを試みた。

5. 既設パイプラインの通水試験への適用

(1) 試験条件

計測対象施設は、全長 $L=8,965\text{m}$ を6区間に分割して充水が行われた。AE計測は、全長の約35%に当たる $L=3,105\text{m}$ の区間(ブロック5および6)で実施された。管種管径はVM $\phi 500\sim 400$ およびFRPM, DCIP $\phi 400\sim 350$ である。充水は設計流量の10%を基準に行われた($Q=0.019\sim 0.025\text{m}^3/\text{s}$)。AE計測は、対象区間の始点と終点に位置する制水弁において連続計測を実施するとともに、充水区間内の空気弁において移動計測(計測: 空水~満水)を実施した。AE計測条件は、しきい値45dBとし、増幅60dBとした。試験概要を写真-2および写真-3に

図-10 充水過程とAE発生挙動(ブロック5)

図-11 最上流部でのAE発生挙動(6号制水弁工)

示す。

(2) 充水過程とAE発生特性の関係

本報ではブロック5でのAE計測結果を概説する。本計測区間での充水過程の概要とAEセンサの設置位置を図-10に示す。ブロック5は、6号制水弁工から7号制水弁工までの $L=2,040\text{m}$ 区間を対象としている。AE計測は、6号制水弁工、7号制水弁工および25号空気弁工で行った。図中のセンサ番号は計測時のチャンネル番号(例えばCh1)と同一である。なお、25号空気弁工近傍では管継手部より漏水事故が発生した(写真-3)。計測結果の一例を図-11に示す。管底部に設置したCh1は、充水開始直後からAEセンサが反応し、満流までAE発生頻度の増加を確認した。管内が満流した後にAEの減少を確認した。Ch2はCh1とは異なり、直管部が満流後、AEの急増を確認し、空気弁浮玉が作動した時点でAEの急減を確認した。同様の傾向は、補修後のPCパイプラインで実施した通水試験においても確認されている¹⁵⁾。本計測においても充水過程と付帯工の作動状況をAE法により

モニタリングした結果、十分な精度で配管内水理現象と水密性能とを評価可能であることが示唆された (図-11)。

以上より、既設パイプラインの通水試験においてAE計測を実施することにより、充水状況を踏まえたリアルタイムでの水密性照査が可能であると考えられる。加えて、補修工事を行った施設では本開発手法を用いることにより補修前後の弾性波特性から補修効果を定量的に評価できるものと考えられる。その際、野外環境下での車両走行に代表される環境ノイズの除去が重要な課題であるが、弾性波の検出過程において適切なフィルタリングを行うことにより十分に除去可能であると考えられる。

このことから、送配水パイプラインの通水試験へ、筆者らが提案した水密性照査法を導入することにより、安全性が不明瞭な状態で行われている現状の通水試験を改善できるものと考えられる。

6. おわりに

本論では、AE法に基づく送配水パイプラインの水密性照査について報告した。モデルパイプラインでの検討を踏まえて、既設構造物でのAE計測の結果、AEパラメータ (例えばAE発生頻度) を用いることにより目視の困難な充水過程を評価できることが示唆された。

参考文献

- 1) 鈴木哲也, 池田幸史, 友田祐一, 大津政康: 老朽化管路施設の機能評価における AE 法の応用と課題, 農業土木学会誌, Vol.71, No.5, pp. 9-12, 2004.
- 2) 鈴木哲也, 大津政康: 老朽化パイプラインシステムの機能評価と非破壊計測 - AE 法による漏水現象の非破壊モニタリング -, 検査技術, 10(8), pp. 24-29, 2004.
- 3) Suzuki, T., Ohtsu, M., Aoki, M. and Nakamura R.: In-Situ Non-Destructive Monitoring of Water Flow in Damaged Agricultural Pipeline by AE, 日本 ICID 協会会報, 18, pp. 73-83, 2008.
- 4) 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.
- 5) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: AU 法による農業用パイプラインに発生した気液二相流の同定, 平成 23 年度応用水理研究部会講演要旨集, pp. 24-28, 2011.
- 6) 鈴木哲也, 中達雄, 樽屋啓之, 久保成隆, 飯田俊彰: モデルパイプラインに発生させた圧力波の非破壊検出に関する研究, 土木学会論文集, A2(応用力学), Vol. 62 (2), 1 727- 1 734, 2012.
- 7) 農業土木事業協会九州支部: 腐食防食マニュアル, pp. 1-29, 1998.
- 8) 名和規夫, 園田和記, 岩田博文, 鈴木哲也: 老朽化した管路施設の機能調査評価, 農業土木学会誌, Vol.70, No.12, pp. 31-35, 2002.
- 9) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 田中洋輔, 皆木卓士: 鉄筋コンクリート管に生じるひび割れ方向性と弾性波伝播特性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp. 1961-1966, 2006.
- 10) Ohtsu, M., Tomoda, Y. and Suzuki, T.: Acoustic Emission Analysis of Concrete for Corrosion, Damage and Cracking Mechanism, Acoustic Emission and Critical Phenomena, CRC Press, pp. 87-102, 2008.
- 11) 中達雄, 樽屋啓之: 用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方, 農業農村工学会論文集, No.256, pp. 9-16, 2008.
- 12) 中達雄: ストックマネジメントに対する水利システムの機能と性能, 農業農村工学会誌, Vol.76, No.3, pp. 201-204, 2008.
- 13) 農林水産省構造改善局監修: 土地改良事業計画設計基準・設計「パイプライン」技術書, 農業農村工学会, pp. 445-449, 1998.
- 14) Hamilton, S. and Charalambous, B.: Leak Detection, pp. 14-24, IWA Publishing, 2013.
- 15) 鈴木哲也, 伊藤久也, 藤田茂: 配管施設における通水シグナルの検出による補修効果の定量的評価, 農業土木学会誌, 70(10), pp. 907-910, 2007.

(2013.7.12 受付)

EVALUATION OF WATER TIGHTNESS IN DAMAGED PIPELINE USING ELASTIC WAVE METHOD

Tetsuya SUZUKI, Naritaka KUBO and Toshiaki IIDA

Deterioration of water-tightness in service pipeline system has resulted from water-leak accidents due to damage accumulation in pipe materials. The repaired pipeline system could not be evaluated to water-leak phenomena under refilling process. Non-destructive evaluation of water-tightness in pipeline system is currently in urgent demand. In this study, acoustic emission (AE) method is applied to the evaluation of water-tightness in service and model pipeline systems. In service pipeline was inspected and then repaired after water-leak accidents. The results show that water-tightness in the pipeline system could be quantitatively evaluated by using AE parameters, such as AE generation behavior and AE energy. Thus, it becomes clear that when a pipeline is being filled with water after the repair work, the situation of water-tightness in the pipeline can be clearly identified through AE monitoring.