

AE法を用いた補修パイプラインに関する充水プロセスの定量的評価

千代田淳¹・鈴木哲也²・伊藤久也¹・青木正雄³・本間辰之介¹・岩田博文¹

¹株式会社日本水工コンサルタント (〒335-0002 埼玉県蕨市塚越5丁目37番地16号)

²正会員 博士(工学) 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 (〒252-8510 藤沢市亀井野1866)

³正会員 博士(農学) 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 (〒252-8510 藤沢市亀井野 1866)

近年、社会基盤施設の維持管理の必要性が見直されることに伴い、既存施設の補修・改修による更新事業が各地で進められている。社会基盤施設の中でもパイプラインは、土中に埋設されている構造的な特色から、更新後の水密性照査が十分に行われていないのが現状である。筆者らは、AE (Acoustic Emission) 法を用いて補修パイプラインの水密性能に関する非破壊照査法を開発している。既往の研究から、充水プロセスにおいて配管内から発生する弾性波 (通水シグナル) を検出することにより、水密性照査が可能であることを明らかにした。本報では、補修パイプラインのポンプ圧送区間を対象にセンサ特性の異なる4センサにより補修後の充水プロセスを実構造物により評価した結果を報告する。

キーワード: AE法, 充水プロセス, 補修パイプライン, センサ特性

1. はじめに

上水道施設などの内水圧を利用した送配水システムでは、遠隔操作による通水量の集中管理が一般的である。しかし、施設の老朽化に伴う不具合は、管理過程で発見されるよりも末端での圧力低下や漏水に伴う地表面の陥没、地震動による損傷などにより顕在化することが多い¹⁾。長期間供用されたパイプラインでは、損傷の蓄積に伴う材質劣化に加えて、制水弁や排泥工、空気弁などの付帯施設の機能低下に伴い送水制御が困難になっている事例が散見される^{2),3),4)}。一般的に漏水事故後のパイプラインでは、補修工事が行われ、再充水による通水試験が行われる⁵⁾。

本研究では、補修・改修における配管施設の水密性照査へAE計測を導入し、水理条件の異なる状態での定量的評価を試みた結果を報告する (図-1)。

本論の構成は、2章において計測対象・原理を示す。3章では結果および考察を示す。4章では結論を示し、AE法を用いたパイプライン施設の充水プロセスにおける水密性照査能に関する検討を行う。それらの結果を踏まえて5章にまとめを示す。

2. 計測対象・原理

(1) 計測対象

計測対象は、管径250mm、内水圧2.6MPa (ポンプ駆動時) の鋼管である。対象区間は、マクロセル腐食 (写真-1) による孔食を補修 (写真-2) した後に充水時にAE計測を行った。

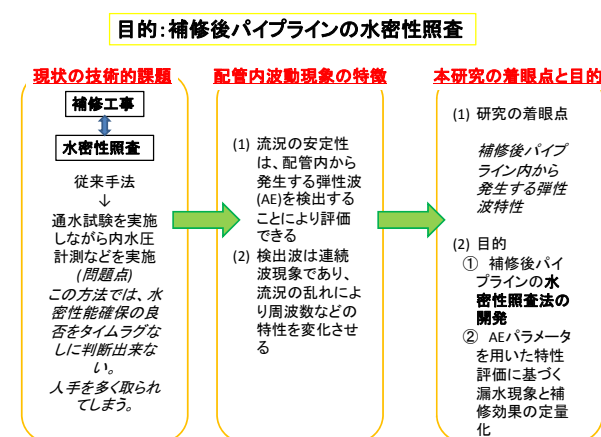


図-1 本研究の着眼点と目的



写真-1 鋼管のマクロセル腐食状況



写真-2 計測対象鋼管の補修状況

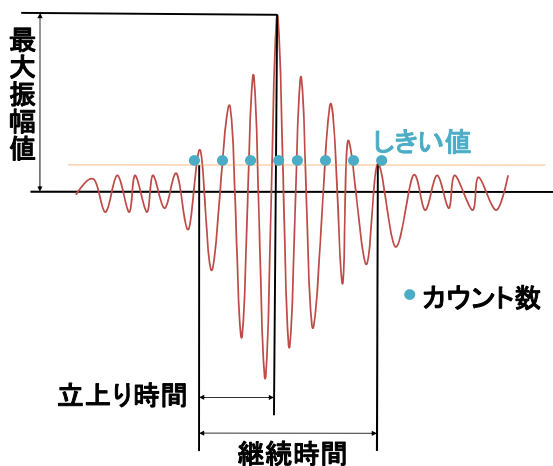


図-2 AEパラメータ (AE: 1ヒット)

AEセンサは、補修点近傍の揚水機場に設置し、充水期間中、連続計測を行った。計測条件は、しきい値45dB、プリアンプとメインアンプで60dBの増幅を行い、60kHz共振型センサおよび共振型センサ2種(30kHz、150kHz)と広帯域型センサ1種の計4種類である。

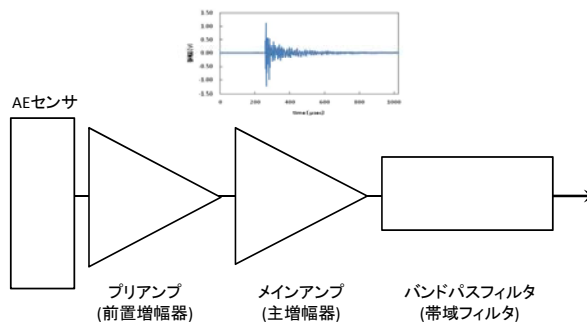


図-3 AE計測システム

(2) AE法による水密性照査

AEとはアコースティック・エミッションの略称である。アコースティック・エミッションとは、固体内部の微小な破壊あるいは同様なエネルギー解放過程において発生する弾性波動現象である。本手法は、対象構造物から発生する弾性波(図-2参照)を受信し、そのAE発生特性から対象構造物(→本計測では鋼管)の損傷状況を評価するものである。

計測は、AEセンサにより検出された弾性波を電気信号に変換した後、フィルタを経て検出される。本計測では、漏水点近傍の揚水機場に4センサを設置してポンプ圧送による充水プロセスをモニタリングした。AE計測システムの概要図を図-3に示す。

水密性照査は充水プロセスにおいて、空虚な状態から混相流を経て、満流となる一連のプロセスを評価するものである。筆者らが提案するモデルを図-4に示す。

本研究ではAE法を用いて漏水現象(水密性照査)の非破壊モニタリングを試みた。

(3) AEパラメータ解析

AE計測結果は検出波の特性を定量的に処理したAEパラメータにより評価可能である。漏水現象は、検出波の特性を下式に示すRA値と平均周波数の関係から環境ノイズと分離できることが明らかになっている³⁾。

$$RA値 = \frac{\text{立上り時間}}{\text{最大振幅値}} \quad (1)$$

$$\text{平均周波数} = \frac{\text{カウント数}}{\text{継続時間}} \quad (2)$$

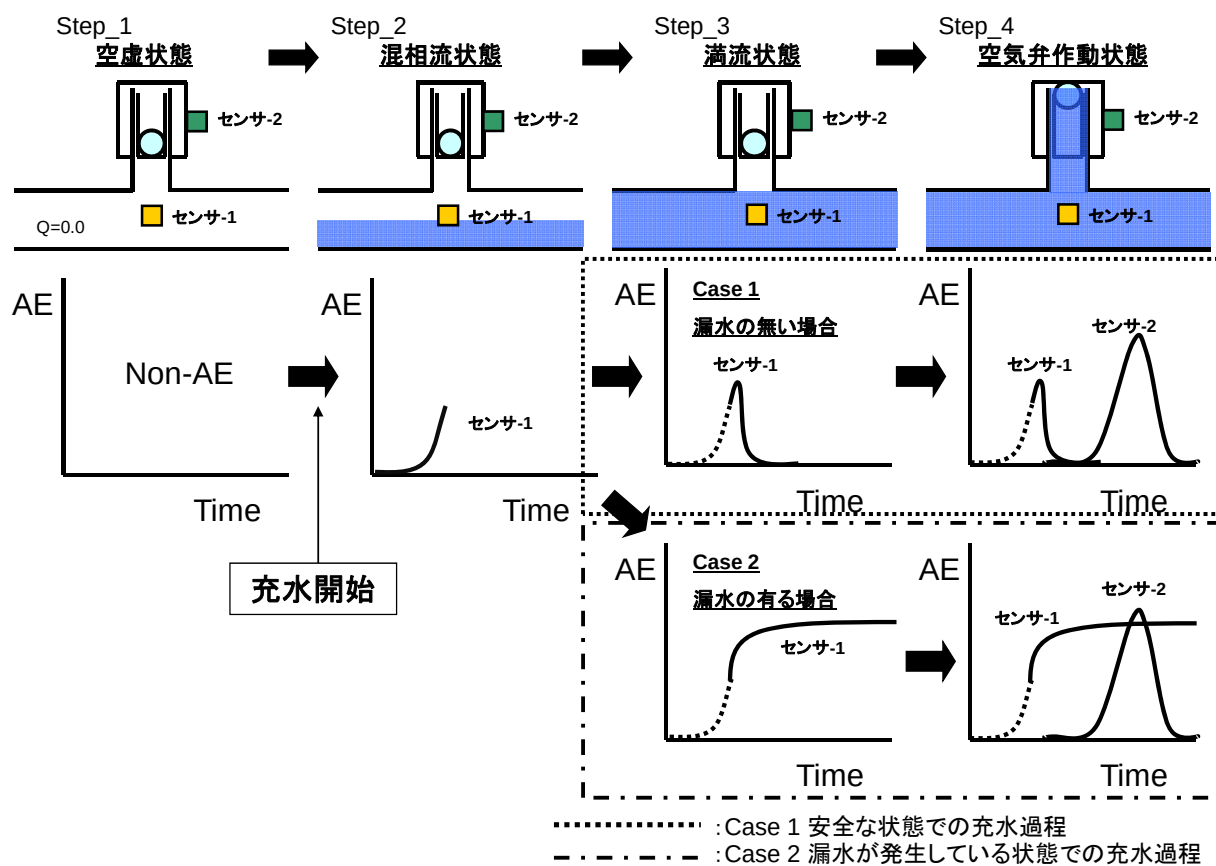


図-4 パイプライン水密性照査モデル

RA値とは、検出されたAE波の波形の特徴を「立上り時間」と「最大振幅値」で表現するものである。平均周波数とは、FFT解析から求められる周波数とは異なり、検出波形の「カウント数」と「継続時間」の関係から対象とするAE波の平均的な周波数を算出するものである。

AEパラメータの中でも環境ノイズが顕著でない条件下であればAEヒット数による比較も配管施設の通水の良否（漏水の有無）を判断するためには有効である。

漏水が発生している配管内では、平均周波数30kHz以下、RA値3sec/V以下に計測値が集中する。既往の研究では、RA値と平均周波数の関係から漏水現象と環境ノイズとの分離を試みており、両指標値の範囲は漏水規模や部位・計測方法により異なるが、漏水現象では図-7とほぼ同様の傾向が認められている。

補修後充水時のAE発生特性を図-8にまとめる。充水時にはパイプライン内の空気が流水と変換されるため、空気弁内の浮玉はstep-1に示すように沈んでおり検出されるAEは少ないが、充水完了時には

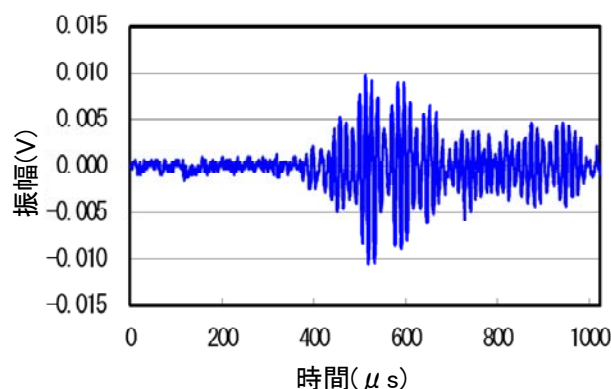


図-5 漏水部での検出波（実漏水現象での検出波）

浮玉が浮き上がり、上部で固定されるため多量のAEが検出される。パイプライン内が満水となるとAEの発生は収束し、検出数が少なくなる。満水時にAEが多く検出されるようであれば、漏水の疑いありと判断できる。

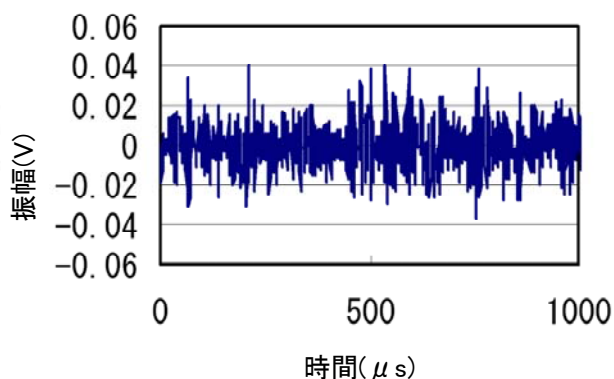


図-6 漏水現象における検出波（室内モデル試験）

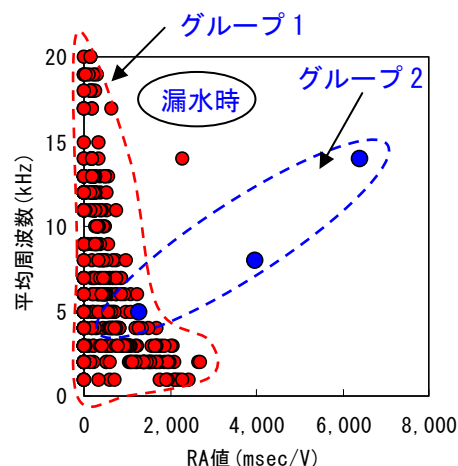


図-7 RA値と平均周波数の関係（漏水部計測データ）

3. 結果および考察

(1) 通水シグナルの特徴と同定

AE計測により検出される弾性波は通水シグナルないし、漏水波に分類される。パイプラインにおける通水シグナルの特徴は、連続型AEが検出される。漏水波では連続型の通水シグナルと比べ周期が短く、周波数の高い波形が計測される。

実構造物で検出される漏水波では、波形に立上りを確認することができる(図-5)。振幅値が非常に小さく、0.001～0.01Vの範囲で計測されている。

モデル試験では実験室内に計測用のモデルを組み立て、疑似漏水を発生させた上で計測をおこなった。モデル試験による漏水波を図-6に示す。検出された漏水波は立上りの確認できない波形となっている。

この相違は計測時のAE発生環境が原因であると考えられる。実構造物で漏水波が発生する環境は、管体内から噴き出した漏水が管体を覆う埋め戻し土等に当たり、跳ね返った水飛沫が管体外面にぶつかることで発生していると考えられる。モデル試験で計測される弾性波は管体と漏水流との摩擦、せん断により発生すると考えられる。

検出された波形についてパラメータ解析を行い、平均周波数 (kHz) とRA値 (msec/V) をプロットグラフにて表したものを図-7に示す。図中に示すグループ1は漏水時に確認された計測結果である。平均周波数が0～20kHzの間でRA値1000msec/V以下に集中して分布する形で計測されており、平均周波数0～5kHz間にはRA値が3000msec/V近くまで達する値が計測された。図中に示すグループ2は漏水のない場合の計測結果となる。計測されるAEヒットが、

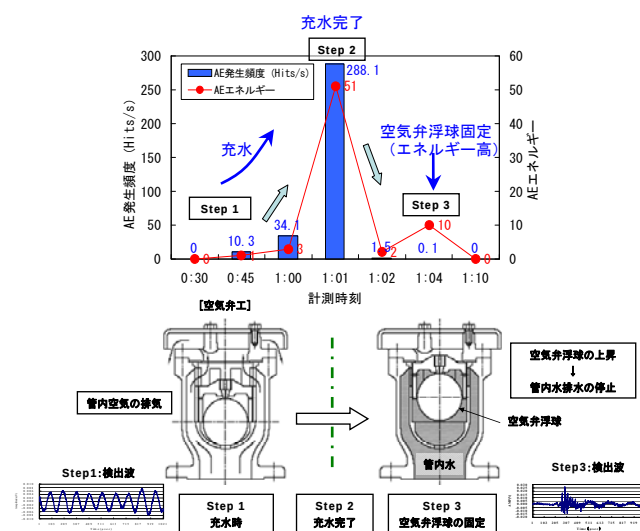


図-8 補修後充水時のAE発生特性

ごくわずかで4000msec/V以上の高いRA値が計測された。

パイプラインの水理現象起源の弾性波は、定常状態の場合、規則的な正弦波となる。混相流や漏水現象が発生する場合、検出波は、一般的に数Hzから40kHzの範囲で記録される。ポンプ圧送区間では、ポンプ動態の影響を受けた周波数領域の高い弾性波が検出される。したがって、パイプラインの水密性能に影響する現象では広帯域での弾性波計測が不可欠であると考えられる。筆者らが用いているAE法は1kHzから数MHzにおよぶ高周波数帯域において同一精度による計測が可能であることから、水密性照査には有効であると考えられる。

(2) ポンプ充水プロセスのAEパラメータ解析

ポンプ送水区間の充水プロセスは、ポンプ駆動に

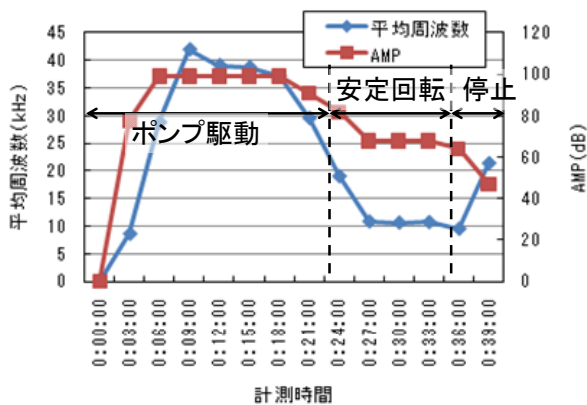


図-9 ポンプ充水プロセスのAEパラメータ特性
(60kHz共振型センサ使用)

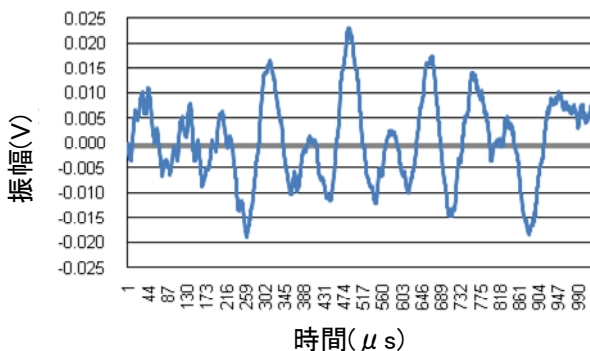


図-10 検出波形（ポンプ駆動時、電動弁開度5%）

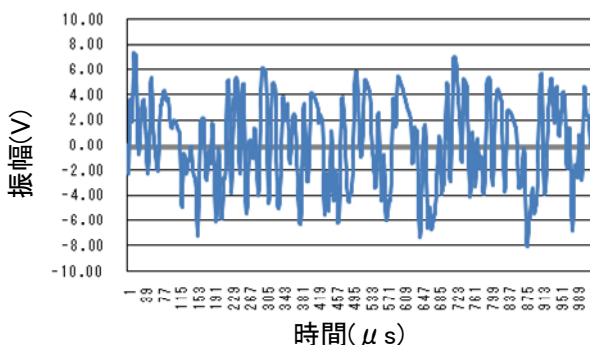


図-11 検出波形（ポンプ駆動時、電動弁開度100%）

に伴い検出波の平均周波数と最大振幅値（AMP）が急上昇し、回転数が安定した段階でAEパラメータが一定値に収束することが確認された（図-9）。

検出波の平均周波数は、ポンプ駆動時に42kHzまで上昇した。充水プロセスは開始後20分で吐出し弁

開度が100%となりポンプの回転の安定と共に周波数が最大時の25%程度の約10kHzまで急激に低下した。同時に計測した最大振幅値は、平均周波数と同様の挙動を示した。

検出されたAE波形は、連続型AEであった（図-10、図-11）

電動弁開度が5%の段階では振幅値が不規則な連続波が検出されているが充水プロセスが安定した段階では図-11に示す振幅値がほぼ一定なAEが検出された。両図の波形形状は、図-9に示す平均周波数と最大振幅値の挙動と密接に関連している。

一連の計測結果からポンプ圧送による充水プロセスは、AE計測結果が計測位置により圧縮空気の挙動の影響を強く受けることが明らかとなった。充水初期段階では、管内空気が圧縮され空気弁より排气される。AE計測を空気弁で行った場合、AEパラメータは水理現象起源のAEとは異なり、圧縮空気の排气によるAEの消失と管内水位の上昇とが一致している。既往の研究では、自然流下を前提にモデルが構築されている。ポンプ送水による充水プロセスでは、既に提案しているモデルとは異なり、ポンプの駆動方法と計測位置によりAE発生挙動が変化する。加えて、漏水現象は内水圧によりその特性を変化させることから、ポンプ圧送時の漏水源の同定には更なる検討が必要である。

(3) センサ特性がAE計測に及ぼす影響

補修パイプラインでの充水プロセスをモニタリングした結果を図-12～図-14に示す。

本報では、平均周波数と最大振幅値を時系列データとして提示した。

検討の結果、いずれのセンサにおいても充水プロセスとAEパラメータとが密接に関連していることが明らかになった。特に平均周波数を評価指標として検討した場合、150kHz共振型センサでは、最大値と最小値の差が41kHzであった。同様の傾向は、60kHz共振型センサにおいても確認された。しかし、30kHz共振型センサでは、150kHz共振型センサの約34%に相当する14kHzであり、広帯域型センサでは18kHzであった。これらの結果から、検出波の周波数特性を指標パラメータとしてポンプ圧送条件における充水プロセスを評価した場合、30kHz共振型センサや広帯域型センサでは、配管内の充水プロセスを150kHz共振型センサと比較して計測精度の低下を引き起こす可能性があるものと考えられる。

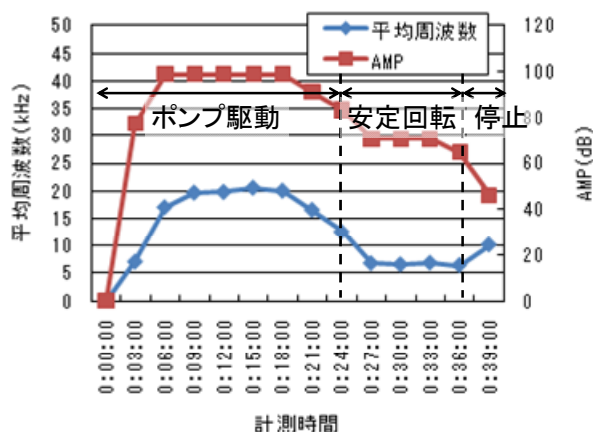


図-12 ポンプ充水プロセスのAEパラメータ特性
(30kHz共振型センサ使用)

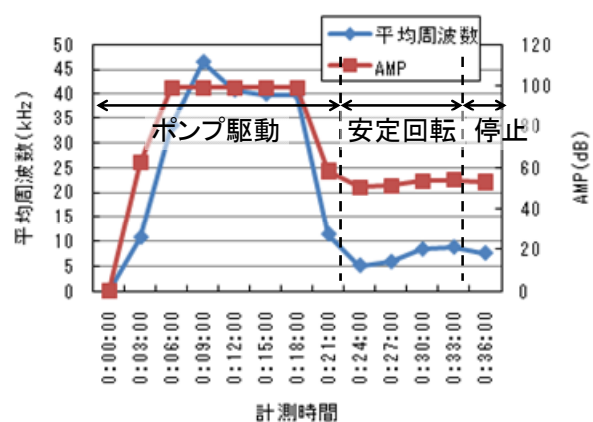


図-13 ポンプ充水プロセスのAEパラメータ特性
(150kHz共振型センサ使用)

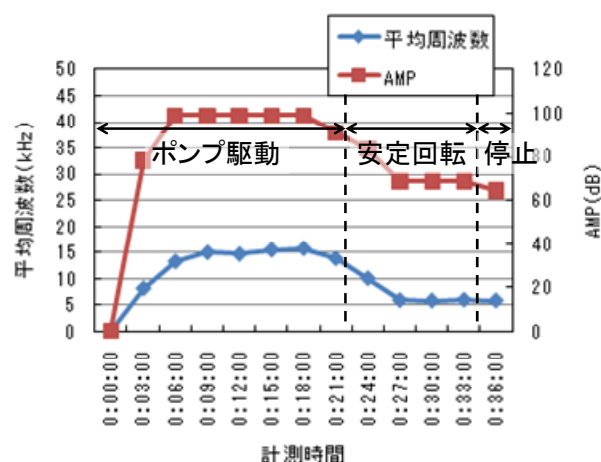


図-14 ポンプ充水プロセスのAEパラメータ特性
(広帯域型センサ使用)

このことから、既往の研究で検討した自然流下による充水プロセスをAE計測する場合と本報での条

件（ポンプ圧送）とでは、通水条件が異なることから計測方法により評価精度が大きく影響されることが予想される。したがって、ポンプ圧送条件ではポンプ挙動を詳細に把握できる150kHz共振型センサなど高周波数領域で弾性波の検出が可能計測が不可欠であると考えられる。

4. 結論

本研究の結果、補修後の通水試験における充水プロセス評価はAEパラメータを用いることにより可能であり、補修効果の検証がAE法により効果的に行えることが、再確認された。

補修パイプラインを対象にポンプ圧送条件での充水プロセスをセンサ特性の異なる4種類のAEセンサを用いてモニタリングした結果、検出されたAEパラメータ（平均周波数）はセンサ特性の影響を受けていることが明らかとなった。適切な計測を実施するためには、ポンプ動態や検出波の周波数領域を考慮したAEセンサの選定が不可欠であることが明らかとなった。

AEパラメータはポンプ動態と圧縮空気の挙動に関連していることが明らかになった。既往の研究で構築した水密性照査モデルが管内水挙動のみを考慮すればよいのに対して、ポンプ圧送条件では管内水に加えて圧縮空気の挙動を詳細に把握する必要があることが本検討から明らかになった。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」技術書：pp. 534-536, 2009.
- 2) 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70(12)，pp31-35, 2002.
- 3) 鈴木哲也，大津政康：非破壊検査の適用による敷設後30年経過したPC管路の定量的損傷度評価，性能設計に関する勉強会報告および研究発表会要旨集，pp49-52, 2004.
- 4) 鈴木哲也，大津政康：内水圧下で長期間併用したPC管の材質評価，農業土木学会論文集235，pp. 75-76, 2004.
- 5) 八戸圏域水道企業団：導水管（鋼管φ1200）漏水事故の概要，水道協会雑誌78(8)，pp. 37-46, 2009.