アコースティック・エミッション (AE) による 埋設鋼管の土壌腐食診断

長 秀雄*, 松尾卓摩*, 守屋信一郎*, 竹本幹男*

* 青山学院大学 理工学部

Monitoring of Soil Corrosion of Underground Steel Pipe by Acoustic Emission

Hideo Cho*, Takuma Matsuo*, Sinichiro Moriya* and Mikio Takemoto*

* Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

Research aims to study the AE activities of the rusts produced by soil corrosion of underground steel pipes. Author compared the AE activities of three types of the rust produced by atmospheric corrosion and soil corrosion by two methods. These are the monitoring of passive AEs under natural drying and active AEs under external turbulence such as forced heat cycles and mechanical loading. The soil-corrosion rust emitted AEs much more than the atmospheric rust did when they were submitted to mechanical deformation at lower strains. AE activities of the soil-produced rusts under cyclic heating (wet-and-dry) are, however, not so high compared to those of the atmospheric rusts. The rust produced on the steel pipe by soil corrosion for 20 years produced weak and few cylinder wave AEs under natural drying, and found to be detected only by AE sensors with resonant frequencies lower than 100 kHz for short distances of few hundred mm. This rust produced a number of AE at some period under cyclic heating, but the prediction of the timing for the rapid AE generation is difficult. Thus long term AE monitoring with highly sensitive AE sensors is needed for the corrosion monitoring of underground steel structures.

Key words : Acoustic emission, guided wave, rust fracture, soil corrosion, atmospheric corrosion, wave attenuation

1. 緒 言

本邦における多くの埋設鋼管は高経年化しており、土壌腐食による内容物の漏洩が起こる危険性がある。配管の腐食減肉を測定する方法として、ガイド波 (円筒波) を用いる長距離検査法が注目されているが、埋設管では減衰が大きく 2~3 m の検査が限界といわれている^{1,2)}。またこの方法では、腐食減肉量は平均的な断面欠損率で評価され、最大減肉量がわからないという問題がある。一方アコースティック・エミッション (AE) 法では減肉量は測定できないが、さび破壊の起こる場所は標定できる³⁾。このとき AE は土壌腐食によって生成したさびの破壊によって発生し、円筒波として検出される。土壌腐食によって生成するさびは土を巻き込んだ硬いさびで、大気さびとは異なった破壊挙動を示すことが予想され、減衰や計測法との兼合いでモニターできる距離が決まる。例えば通常の PZT センサは管周上の一点の振動を計測するので円筒波 AE の検出感度は必ずしも良くないが、管に巻き付けた光ファイバをセンサとする方法では、ファイバ巻き数を上げれば感度は大幅に改善でき、3~4 m の検出が可能になる。

著者らは大気腐食で生成したさび (大気腐食さびという) の破壊による AE について調べたが、AE はさびの成長による体積膨張による破壊 (自壊) のほか、温度変動や負荷によるひずみ (これらをまとめて外的攪乱という) による破壊、破壊したさびの摩擦によって発生することがわかっている^{4),5)}。自壊による AE 発生頻度はさびの成

長速度があまり速くないので、外的攪乱による AE 頻度に比べて小さい。また土壌腐食によるさび (土壌腐食さび) は、日照などによる温度変動が小さいことが多いので、AE 発生頻度は低いと予想され、AE モニタリングに長時間を要する。一方もし、埋設配管に内圧などの外的攪乱⁶⁾ が与えられれば、比較的短時間の AE モニタリングで腐食の有無が検出できる。さびの自壊や自然乾燥による AE がパッシブな AE (静かに待って検出する AE) とすれば、外的攪乱による AE はアクティブな AE と言える。いずれの AE を検出するにしても、どの程度の振幅をもつ AE が発生し、どの程度の増幅率と距離で検出できるかが問題になる。しかし実際の埋設管についての AE モニタリングとさび破壊規模 (AE 活性度) についてはほとんど研究されていないので、この問題について実験的な検討を行った。

はじめに SPC 鋼板を土中に埋設および大気に暴露して生成させたさびの性状とアクティブ AE の活性度を比較した。鋼板を用いた理由は、さびを破壊させる機械的ひずみの定量化が鋼管では難しいからである。次に 20 年間土壌中に半埋設して腐食させた鋼管の土壌腐食さびによる円筒波 AE を計測した。この実験では、防食テープと土壌による円筒波の減衰を調べ、自然乾燥によるパッシブ AE や温度変動によるアクティブ AE の活性度と AE 計測距離を検討した。

2. 土壌腐食さびと大気腐食さびの性状と AE 活動度

土壌腐食サンプルの作成は、場所によって土質や腐食性物質の含有量、濡れ・乾き頻度などが異なるために難しく、本報で用いたサンプルが土壌腐食を代表するものではない。土壌には、関東地方でよく見られる赤土 (東

* 〒229-8558 相模原市淵野辺 5-10-1 (5-10-1, Fuchinobe, Sagami-hara, 229-8558 Japan)

京都小金井で採取)と黒土(撒き土, 多摩地区で採取)を用いた。赤土や黒土という呼び方は学術的ではなく, また組成も調べていないが, 関東4ローム層の立川面と多摩面に相当する層土と考えられる⁷⁾。土壌の腐食性は, フミン酸などの有機物濃度やバクテリアなどにも影響されるが, これらの影響は調べていない。

腐食試験では2種類の土を別々にプラスチック容器(150 mm^H×300 mm^L×200 mm^W)に入れ, 45 mm^H×90 mm^L×1 mm^Tの短冊状SPC鋼板を1箱に横に3枚ずつ埋設し屋外に設置した。このとき短冊状試験片の中央20 mm×20 mm 正方のみを暴露し, 周囲は防食テープ(JIS Z1901, ポリ塩化ビニール粘着テープ)で被覆し, 2006年6月1日から2, 5, 10週間, 八王子市の田園環境に放置した。また同じ場所と同じサンプルを大気暴露して大気さびを生成させた。試験片は都合270枚(土壌腐食に140枚)で, 取り出したあと4点曲げや繰返し加熱によるAE活性度を調べた。なお再現性は試験片枚数の関係で調べていない。

Fig. 1は10週間暴露後のさび表面実体顕微鏡とSEM写真(実体顕微鏡写真の丸内)である。土壌に埋設した鋼板には, 柔らかい金属ワイヤブラシでも除去できない硬い塊状の1 mm以上のさびが暴露面積の60%以上に生成し, 特に赤土に埋設したもので厚く成長した。一方大気さびで0.5 mmを越えるさびは暴露面積の5%以下である。SEM写真は場所によって大きく変化するが, 土壌腐食さびには塊状のさびこぶが観察されやすい。

Fig. 2は, 赤土に5週間埋設したさびの断面EMPMA解析結果である。日本における火山灰土壌では, SiO₂(約42 mass%), Al₂O₃(37%), Fe₂O₃(9%)のほか2%以下のCaO, MgO, K₂Oと有機物が存在する。元素分布結果に基づいてSEM写真に土壌成分を書き込んだが, 矩形のSiO₂やAl₂O₃粒が検出され, 甲羅状の多くの微小割れが観察される。一方大気さびについてはこのような多くの甲羅状の割れは観察されず, 層状構造になりやすい。さびは[Fe and O]として示しているが, 乾燥後のX線回折ではFe₂O₃, Fe₃O₄が主成分である。

3. 大気さびと土壌さびのAE活性度

さびがもつAE活性度を評価することは試みられておらず, 本研究では1)荷重付加によるAE活性度と2)温度変動に伴う濡れ・乾き中のAE活性度を測定した。AE活性度としては, さび破壊の大きさを表すAE振幅と破壊頻度を表すAEイベント数を測定した。鋼板では色々なモードの分散性の板波(ラム波)が伝播するためAE波形は連続波的特徴(長時間波が持続)⁸⁾をもつ。このため, ヒット数は意味がなく, またF-モード波の振幅や持続時間は破壊場所(管の表面か表面下か, センサからの距離)によって大きく変わるので, AEエネルギーの測定はおこなっていない。

Fig. 1 Surface morphology of the rusts produced on steel exposed to out door atmosphere and soil. (upper pictures: optical microscope, lower pictures: SEM)

Fig. 2 Transverse SEM of the rust produced in red soil and elements revealed by EPMA

3.1 曲げによるさびのAE活性度

中央部20 mm×20 mmにさびをもつ短冊試験片に3点曲げ(スパン間距離30 mm)を与え, さびの周辺30 mm 正方の頂点に設置した4個の小型の共振型AEセンサ(PAC社PICO, 共振周波数0.45 MHz)でモニターした。荷重点(中央スパン)のひずみはひずみゲージで測定し, 0.2%まで負荷した。センサ出力は60 dB増幅し, 高速ディジタルライザーで離散化データとしてコンピュータに取り込み, 独自に開発したソフトで解析した。Fig. 3は, 3種類の試験片の累積AEカウントとひずみの関係である。図中には累積AEカウント数と平均振幅も示した。大気さびからのAE発生数は5週間暴露後も100カウント以下であるが, 赤土埋設板からのAE数は2週間後には600カウントに達する。図中の垂直矢印は, 連続してAEが検出されはじめたときの引張りひずみで, 土中埋設板の方が, また埋設期間が長くなるほど小さくなり, わずか0.022%のひずみでAEが発生するようになる。内圧が付加できるような埋設配管では, このような外的攪乱付与法は有効に使用できる。土壌腐食さびは厚く成長するが, AE振幅は大気さびによるそれらと大きくは変わらない。これはFig. 2に示したように, 小さな割れが自然乾燥中に多く発生したためであると思われるが, 湿った

実構造物に外的攪乱を与える場合の AE 活性度は本研究結果とはかなり異なると思われる。

3.2 繰返し加熱（濡れ・乾き）によるさびの AE 活性度評価

大気中に取り出したさびは自然乾燥し、赤外線ランプを用いて繰返し加熱（25-40℃）しても AE は検出されなかった。これは後述するように乾燥時に多くの割れが発生するからである。すなわち一度乾燥させたさびについては、長時間にわたって濡れ状態を保ったあと、乾燥中の AE を測定して AE 活性度を評価する必要がある。そこで、一度乾燥させたさびを 24 時間水道水に浸漬したあと、赤外線ランプを用いて 40℃ に 30 分加熱したのち 25℃ まで 30 分空冷する操作を 2 回繰返し、その間の AE 発生数と振幅を測定した。浸漬時間によって AE 活性度は異なると思われ、今後詳細に検討する必要がある。24 時間浸漬には何の根拠もない。なお AE の計測法は前節と同じである。

Fig. 4 は、2 週間と 10 週間の土壌腐食さびの繰返し加熱中の温度変化と累積 AE 変化である。なお、縦軸のカウン数は左右で約 4 倍異なっている。また紙面の都合で 5 週間暴露さびのデータは割愛した。2 週間暴露大気腐食さび（ a_2 ）では AE はほとんど検出されていないが、土壌腐食さび（ b_2 , c_2 ）では 20~30 カウントの AE が検出されている。AE は 1 回目の乾燥中に検出されているが、2 回目の加熱中にはほとんど検出されていない。10 週間後のさびでも最初の 40℃ 加熱中に多くの AE が検出され、そのあとの AE 数は少ない。総カウン数は約 170（土壌腐食さび： b_{10} , c_{10} ）から 200（大気腐食さび： a_{10} ）で、大気腐食さびの方が土壌腐食さびよりも多くの AE を放出している。Fig. 5 は、2 回の繰返し加熱・冷却中に検出された総 AE 数と平均振幅の関係である。変化は極めて複雑で、大きな振幅の AE は 5 週間暴露して生成したさびから発生しており、暴露期間が 10 週間になると発生頻度は高いが振幅は小さくなっている。また、大気腐食さび（図中の A）と土壌腐食さび（R, B）からの AE 振幅や発生頻度の間には明瞭な大小関

Fig. 3 Cumulative AE counts of the rusts of three types (outdoor, black and red soil) during three point bending

Fig. 4 Change of cumulative AE counts wet rusts of three types during two heat cycles from 25° to 40°C

係はなく、大気腐食さびの方が大きな振幅の AE を発生するケースもある。ここで得られた傾向も、実験室試験で得られた結果であって、実構造物のさびも同じ傾向を示すと考えない方がよからう。

さびはゆっくり成長し、脆い物質であるから、大きな

Fig. 5 Change of both the amplitude and cumulative AE counts during two heat cycles from 25° to 40°C with exposure period

Fig. 6 Change of cumulative counts and amplitude of AEs generated during drying process of wet rust produced by 5 weeks exposure to black soil

割れが多量に起こるとしばらくは大きな割れは起こりにくくなることは十分考えられる。Fig. 6は、湿黒土（5週間埋設）から引上げて大気中で自然乾燥させたときのAEを検出したものであるが、乾燥中に膨大な数のAEが検出されている。振幅も測定レンジをオーバーするほど大きい。比較的緩慢な環境変動を受ける土壌腐食さびは、とくに最初の乾燥時に頻繁な大きな破壊が起こるのであるから、このようなタイミングを逃さずAEがモニタリングできれば、腐食の有無程度は検出できる可能性がある。しかしそのタイミングを予測したり決めることは難しい。従って長期間にわたるAEモニタリングが不可欠である。長期間モニタリングでは、圧電型センサを用いる現行の並列型システム（1個のセンサに1台のプロセッサ）では限界があるように思われる。圧電型センサを用いる円筒波の点計測では、次節で議論するようにAEが有効に検出されないこともあるので、センサについての改良も必要になる。

4. さび破壊による円筒波 AE

4.1 円筒波の特性と減衰

円管を伝播するAEは、音源と検出点まで距離が管直径の約7倍以上になると円筒波として検出される。距離

Fig. 7 Vibration modes of Longitudinal (L-) and flexural (F-) mode cylinder waves

Fig. 8 Group velocity dispersions of L- and F-mode cylinder waves

が短いと前節のような板波として検出されるが、埋設管について板波をモニタリングするような条件は無理である。円筒波の理論的な解析は1959年代に Gazis⁹⁾によって解析されている（ただしこの論文における特性方程式の要素 C_{13} には間違いがある）が、円筒波には Longitudinal (L-), Flexural (F-), Torsional (T-) モードがある¹⁰⁾。さび破壊によって励起される円筒波は L-と F-モードで、Fig. 7には L(0, 1), F(1, 1), F(2, 1) モード波の振動を図示した。振動モードは $L(n, m)$ のように表記され、 n は管全体としての振動の節の数を、 m は板厚内での振動の節の数を表す。たとえば L(0, 1)-モード波は、管全体が口をパクパクするように振動（節がない）しながら伝播し、板厚内に1個の振幅分布の節があり中立軸に対して非対称な振幅分布をもっている。L-モードよりも振幅の大きな F(1, 1)-モード波は、Fig. 7の(b)のように1個の節を持ってうねるように振動している。これらのモード波は、Fig. 8に示すような、きわめて複雑な速度分散を示し、色々なモード波が次々と伝播して来るのでAEは連続波の特徴を示す。F(1, m)-モード波で大事なことは、Fig. 9に示すような円周方向の振幅分布を持っていることである。図にはレーザ干渉計で測定した L-モード波と F-モード波の面外（半径方向）振動変位を示すが、L-モード波の振幅（図中の Peak A）は円周上のどの位置でも同じであるが、F(1, m)-モード波 (Peak B) の $\theta = 90^\circ$ の面外方向の振幅はゼロになる。したがって、受感部直径の小さな圧電素子センサ（面外振動を計測）を円周上

Fig. 9 Change of L- (peak A) and F-mode (peak B) amplitudes with various sensor angles (θ)

の一点に設置して円筒波を検出する場合、AE が検出されないか、振幅が極めて小さいことがあり間違った結果を生む危険性がある。このことは円筒波 AE のモニタリングでもっとも注意しなければならない点である。またこの振幅分布のため、後述する F-モード波の見かけの減衰係数は、センサの設置位置によって変化するような結果になる。

円筒波 AE で長距離埋設配管の腐食（さび破壊）をモニタリングする場合に面倒な別の問題は、土壌や防食テープ（rust protection tape という）による減衰である。しかし円筒波の減衰についての報告はない。そこで、基本的なモード波である L(0, 1)-と F(1, 2)-モード波の減衰を Fig. 10 の装置を用いて測定した。(A)は、防食テープ (JIS Z1901, 4mm 厚のポリ塩化ビニール粘着テープ) による減衰、(B)は湿黒土（含水率 40%）による減衰の測定法で、これらの減衰材は右半分の 1000 mm の範囲にそれらの幅を 100 mm ずつ増加させながら設置した。湿黒土はプラスチック円筒を管にかぶせ、鋼棒でつき固めて充填した。円筒波は直径 80 mm の縦波用圧電トランスミッタ（共振周波数 100 kHz）で右端全面を打撃して励起し、円管中央に設置した 3 個の共振型圧電レシーバ（共振周波数：450 kHz の受感部径 4 mm の

圧電型センサ：PAC 社 PICO）で検出した。3 個のセンサは円管外周に 120° おきに設置した。なお、左半分のテープはハーフラップ巻きした高減衰テープで、管左端からの反射波を抑えるためのものである。Fig. 11 は、防食テープと湿黒土の設置長さ：L を変えたときの検出波形（120° センサ）である。初動部にみられる小さな波束が L-モード、振幅の大きな後続波が F-モード波である。なお L=0 mm は減衰材のない管での検出波である。分散性波動の減衰を、モードに分けて厳密に測定するには特殊な方法を用いる必要¹¹⁾があるが、現場では検出波の振幅が判断基準になることが多い。そこで今回は、L-と F-モード波の最大振幅を用いて見掛けの減衰率を求めた。Fig. 12 は、防食テープと湿黒土による減衰である。防食テープでは、L-モード波のデータばらつきは少なく、減衰率 α は -12.7 dB/m であるが、F-モード波ではセンサ角度（□：0°, △：120°, ○：240°）によるばらつきが大きい。これは Fig. 9 に示したような円周方向の振幅分布に起因している。F-モードの平均減衰率は -6.8 dB/m である。一方、湿黒土による L-モード波の減衰は -0.8 dB/m と小さい。F-モード波の減衰も -3.8 dB/m 程度である。すなわち、埋設管の AE 計測を難しくしているのは防食テープによる減衰（いわゆるアスファルトジュート巻きの減衰はさらに高い）で、湿土による減衰ではないと考えられる。防食テープによる減衰は、特に粘性（防食性）に優れているときが大きく、劣化してくると小さくなる。土壌腐食はテープ劣化部で起こりやすいので、さび破壊による AE が検出されれば、テープの防食性能

Fig. 10 Experimental setup for wave attenuation of cylinder wave by rust-protection tape and wet soil

Fig. 11 Waveform changes with the lengths of the tape and wet soil

はかなり低下して腐食が進んでいると考えてよさそうである。防食テープの防食性能は3年経つとかなり低下するといわれているので、劣化テープの減衰を評価する方法の開発が必要である。

4.2 土壌腐食さびをもつ埋設鋼管のAE活性度

約20年間土中に埋設して腐食させた直径39 mmの鋼管(肉厚1 mm)を掘り上げて、再び実験室の湿黒土中に埋設してAE活性度を測定した。本鋼管は古い鋼製物干し竿(外面は薄いポリエチレンで被覆)で、これを1000 mm長に切断した後エチレン被覆に50 mmのカッター傷をつけ、傷のある面を下にして半面を土中に埋設して作成したものである。切断管の両端はシリコンゴム栓で密閉し、内面の腐食は防止した。3本埋設したが、掘り上げたとき2本には貫通腐食が見られたので、貫通寸前の1本を実験に供した。Fig. 13の(B)は腐食部の外観写真とAE音源位置標定(Fig. 15のAE)結果である。約100 mm長の厚いさびが生成している。この鋼管を長さ500 mmのプラスチック箱に貫通させ、含水率40%の湿黒土

に埋めなおして室内(25℃)で4カ月保持後、Fig. 13(C)に示したように6個のAEセンサを用いてAEを計測した。4カ月間保持期間中は2週間に1回1000 mlの水道水を供給し、濡れ・乾き状態を与えてさびを活性化させた。センサには、PAC社:R15(150 kHz共振周波数, チャンネル(ch.1と6), PAC社PICO(450 kHz, ch.2,5), JTトーシ社JT(1 MHzまでの広帯域, ch.3,4)の3種類を用いた。このうち、JTセンサ出力には60 dBの増幅(前置増幅器20 dB+主増幅器40 dB)を、残りのセンサ出力は40 dB増幅した。Fig. 13(A)に示した写真は、貫通試験片から採取した腐食断面写真であるが、土を巻き込んださびが厚く成長している。

はじめにさび以外の部分に防食テープをまいて1週間AEをモニタリングしたがAEは検出されなかったのでテープは取り外した。さびの破壊頻度が少なかったのか、減衰が大きかったのかはわからなかったが、テープを取り除くと次に述べるようにAEは検出されたので、音源が弱く(さび破壊規模が小さく)減衰が高かったためと思われる。

Fig. 12 Change of amplitudes (dB) of L- and F-modes with lengths of the tape (left) and wet soil

Fig. 13 AE monitoring of buried corroded pipe (C) with the rust (A) and source locations of AEs (B)

Fig. 14 は、4 カ月保持後の乾燥状態に近い土壤に 300 ml の水を 5 回に分けて供給したときの 1 日における電位 (Cu/CuSO₄ 電極基準) と累積 AE 数である。腐食電位は鋼管に接する土壤の湿潤状態に依存して変動し、AE 活性度もさびの濡れ・乾きに依存して複雑に変化する。1 日間で検出された全 AE 数は 25 個でかなり少なく、頻繁に AE を放出するタイミングの予測も難しい。土壤腐食さびの AE 活性度は必ずしも高くないので、1 日程度の短時間モニタリングで腐食の有無を判断するには問題がある。

次に 2 週間放置したのち、赤外ランプで土壤を加熱して AE をモニタリングした。Fig. 15 は、25° から 30℃ (900 ks まで)、30° から 35℃ (90 ks 以降) の加熱・冷却を計 15 回繰り返したときの腐食電位と累積 AE 変化であるが、130 ks 近傍で AE 発生数は急増したがそのあとの発生は見られなかった。AE 急増のタイミングを予測することは難しい。このとき検出された AE 波形の一例を Fig. 16 に示した。図の右下には、各センサの増幅率を示した。共振周波数の高い PICO センサは AE をほとんど検出していない。また JT センサ (3, 4 ch.) で検出した F モードの周波数は、80~100 kHz 程度であることから、100 kHz 以下の共振周波数をもつセンサで 60 dB もの増幅が必要である。さびの左に設置したセンサ (1, 2, 3 ch.) の振幅に対して、右に設置したセンサ (4, 5, 6 ch.) の振幅が小さいのは、さびの左端部分が割れたことを意味している。言い換えれば、わずか数百 mm 音源が離れると AE は検出しづらくなる。湿土壤による減衰 (Fig. 12) は比較的小さいが、それでも数 m にわたって AE を検出することは難しい。チャンネル 1 センサは初動部に弱い L-モード波を検出しているが、そのほかのセンサは L-モード波は検出していない。これは、破壊規模が小さかったため、すなわち一般に F-モードに比べて L-モード波は励起しにくいことによると思われる。また伝播距離が短い場合には、弱い L-モード波は大きな振幅の F-モード波に埋もれやすいため、F-モード波のみが検出されているように見える。左右 2 個以上のセンサが検出した AE の初動到達時間差と L-モード最速群速度 5200 m/s (Fig. 8) から軸方向の音源位置標定を行った結果を Fig. 13 の (B) に示した。さびのある位置に同定された AE が多く、さび以外のところにも同定されている。今回の実験では、すべてのセンサを同一線上に設置して円筒波 AE を検出したが、円周上どの位置で最も大きな振幅の AE が検出されるか調べるべきであった。実配管の検査では、円周上にいくつかのセンサを設置して大きな振幅の AE を検出するようにすることが必要であるが、さびの位置によって最大振幅の円筒波 AE が検出できるセンサ位置は変化するという面倒なことが起こる。円筒波を用いて腐食 AE を測定する方法における難しさがここにある。

埋設ガス配管のように、加圧による漏洩検査や耐圧試験が行える場合には、Fig. 3 に示したような機械的破壊によるアクティブ AE を検出することができる。一方パッシブな AE は発生頻度が少なく、また発生タイミン

グが予測しにくいので、感度を大幅に改善したセンサと長時間計測が出来るシステムが必要になる。光ファイバー AE センサ^{12)~15)} は、配管に巻きつけて使用すれば、全周長の変化を計測するので感度が大幅に改善でき、かつ長時間のモニタリングを可能にする。圧電素子が示す周

Fig. 14 Change of corrosion potential and cumulative AE counts from corroded pipe buried in black soil. AE monitoring at three months and 5 days after pipe set wet black soil

Fig. 15 Change of potential, temperature and cumulative AE counts of the buried pipe with cyclic heating and cooling of the pipe. AE monitoring at four months after pipe setting in wet black soil

Fig. 16 Example of AE waveforms from rust fracture of buried pipe

上の振幅変動も心配する必要がない。このような新しい AE 計測システムがパッシブ AE のモニタリングには有望と考えられる。

結 論

埋設鋼管の土壤腐食で生成したさびの性質と、さび破壊による AE が検出できるか否かをモデル試験片を用いて調べた。結果は以下のようにまとめられる。

1) 土壤腐食で生成したさびは、土中に含まれる無機物質を巻き込んで塊状に厚く成長し、負荷ひずみや温度変動(土壌の濡れ・乾き)によって破壊する。負荷ひずみによる土壤腐食さびの破壊頻度(AE 発生率)は、大気さびに比べて大きい。しかし、温度変動によるアクティブ AE の発生頻度や振幅は、埋設期間が長くなれば大きくなるわけではなく、AE モニタリングのタイミングや期間についての知見は得られなかった。

2) 防食テープや土壌による円筒波の減衰(100 kHz)を測定した結果、防食テープによる L-モード波の平均減衰率は -12.7 dB/m、F-モード波のそれは約 -6.8 dB/mと測定された。土壌による減衰データはかなりばらついたが、防食テープによるそれらに比べてかなり小さい。F-モード円筒波の振幅は、円周上の位置によって変化するので、大きな振幅の AE が検出できるセンサ設置が必要である。

3) 約 20 年間屋外で埋設して生成させた土壤腐食さびをもつ 1000 mm 長の鋼管を再度埋設し、自然乾燥や強制温度変動による円筒波 AE をモニタリングした。防食テープを持つ埋設鋼管の自然乾燥では AE は検出できなかった。埋設裸管ではさび破壊による AE は検出できたが、音源規模は小さく、検出距離は数百 mm 程度に限られることがわかった。強制加熱・冷却では突発的な

AE が検出されたが、そのタイミングは推定しにくい。

4) AE 検出には 100 kHz 以下の共振周波数をもつセンサが有効と思われる。土壤腐食さびの AE 活性度は経時的に変化するので、短時間のモニタリングではパッシブ AE は検出しにくい。高感度で円筒波 AE を検出できる新しいセンサや、長時間モニタリングのできる新しい AE システムを用いたモニタリングが必要である。

参 考 文 献

- 1) Research Committee on Guided Wave Testing, *J. Jpn. Soc. Nondestructive Inspection*, **54** [11] 596 (2005).
- 2) T. Ikeda, R. Kinbara, M. Miyazawa, I. Matsuoka and M. Fujiwara, *J. Jpn. Soc. Nondestructive Inspection*, **54** [11] 595 (2005).
- 3) H. Cho, G. Watanabe, A. Yonezu, H. Suzuki and M. Takemoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **55** [9] 406 (2006).
- 4) M. Kanzawa, H. Cho and M. Takemoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **53** [10] 489 (2004).
- 5) M. Takemoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **51** [6] 256 (2002).
- 6) A. Yonezu, S. Ito, K. Morozumi, H. Cho and M. Takemoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **54** [7] 329 (2005).
- 7) Earth Science Group, *Cyclopedia of Earth Sciences*. Heibon-sha (1996).
- 8) T. Sato and M. Takemoto, *Zairyo-to-Kankyo*, **48**, 371 (1999).
- 9) D. C. Gazis, *J. Acoust. Soc. Am.*, **31**, 568 (1959).
- 10) H. Nishino, S. Takashina, F. Uchida and M. Takemoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 364 (2001).
- 11) H. Kasama, M. Takemoto and K. Ono, *J. Jpn. Soc. Nondestructive Inspection*, **49** [4] 269 (2000).
- 12) T. Matsuo, H. Cho and M. Takemoto, *Progress in Acoustic Emission XIII, JSNDI*, 19 (2006).
- 13) T. Hayano, T. Matsuo, H. Cho and M. Takemoto, *Progress in Acoustic Emission XIII, JSNDI*, 205 (2006).
- 14) H. Cho, R. Arai and M. Takemoto, *J. Acoustic Emission*, **23**, 72 (2005).
- 15) H. Cho, K. Naruse and M. Takemoto, *J. Jpn. Soc. Nondestructive Inspection*, **55** [6] 295 (2006).

(Manuscript received February 15, 2007;
in final form April 19, 2007)

要 旨

土壤腐食によって埋設鋼管に生成するさびの AE 活性度を調べた。大気腐食と土壤腐食で生成した 3 種類のさびの AE 活性度を 2 種類の方法を用いて調べた。それらは、自然乾燥によって発生するパッシブな AE と、強制熱サイクルや力学負荷などの外的攪乱によるアクティブな AE である。土壤腐食さびが力学的変形を受けたときには、小さなひずみで、大気腐食さびよりもはるかに多くの AE を発生した。しかし繰り返し加熱(濡れ・乾き)を受ける土壤腐食さびの AE 活性度は、大気腐食さびのそれに比べて必ずしも高くない。20 年間の土壤腐食で生成した鋼管のさびは、自然乾燥のとき数少ない弱い円筒波 AE を放出したが、このような弱い AE は共振周波数が 100 kHz 以下の AE センサを用いて数百 mm のような短距離モニタリングによってのみ検出できることがわかった。この土壤腐食さびは、繰り返し熱サイクルを受けると、あるとき多くの AE を放出したが、頻繁な AE を放出するタイミングを予測することは難しい。従って、埋設配管の腐食モニタリングでは、高感度なセンサを用いた長期間のモニタリングが必要である。

キーワード ガイド波、さび破壊、土壤腐食、大気腐食、減衰