

# 1995年兵庫県南部地震で被災したコンクリート杭 に対するAE法破損度調査の適用性

森 伸一郎<sup>1</sup>・塩谷 智基<sup>2</sup>・岩城 圭介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科 助教授 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 学博 飛島建設株式会社 技術研究所 研究員 (〒270-0222 千葉県関宿町木間が瀬5472)

<sup>3</sup>正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 研究員 (〒270-0222 千葉県関宿町木間が瀬5472)

新たに開発したAE法によるコンクリート杭の破損度調査法を、1995年兵庫県南部地震で被災した構造物基礎杭に適用した。実施の現場での適用に当たってはAE計測のための導波棒の方式を新たに開発した。3件の現場において適用し、開発した手法を掘削観察法や衝撃弾性波法などの他の調査法と比較することなどによりその妥当性や手法の特徴を検討した。その結果、比較が可能な範囲では本手法の妥当性が確認された。また、導波棒による間接計測と杭体の直接計測との比較により、本手法の背景となる現象も観察できた。

*Key Words* : AE(acoustic emission), concrete pile, damage inspection, field test,  
1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, source location, suspended wave guide

## 1. はじめに

本論文は、コンクリート杭の破損部から射出されるAE波を利用した新しい概念の基礎杭の非破壊調査法を、1995年1月17日に起きた兵庫県南部地震で被災した構造物のコンクリート杭に対して適用した結果を報告するとともに、他の手法との比較によって本手法の現場での適用性を論じたものである。

森・塩谷<sup>1)</sup>は、地震で被災した構造物を支持するコンクリート杭に対して、AE法による非破壊検査手法として位置づけられる破損調査法を開発し、その可能性や妥当性などを室内実験と現場実験により確認した。この調査手法が、実際の地震被害現場に適用され、さらに広く利用されるためには、いくつかの理論的・技術的・経済的課題を解決すると同時に、信頼性、操作性、経済性のそれぞれが程良くバランスの取れたものである必要がある。さらに、手法の標準化とともに様々な立場からの要求に応えられるための高度化と簡略化も必要になる。

ここでは、現場に適用するに当たって解決すべき課題を明らかにした上で、それらに対する解決策を提案する。先の論文<sup>1)</sup>で述べた室内実験と現場実験

による手法の妥当性を確認した上で、1995年兵庫県南部地震で被災した構造物のコンクリート杭に対して本手法を適用した。ここでは、現場に応じた解決策の適用と本手法の結果を報告するとともに、他の調査法との比較によって本手法の現場での適用性を論ずる。

## 2. 本手法の原理・特徴と現場対応策の開発

### (1) 杭の被害調査法の現状と本手法の特徴

#### a) 他の杭の被害調査法とその特徴

森・塩谷<sup>1)</sup>は、現在利用されている杭の被害調査法を、AE法と併せて、その内容・特徴・適用性などの観点から整理して示した。

調査方法としては、上部構造と同様に直接目視観察するのが最も確実な方法であり、掘削露出観察法や内視カメラ法がそれに相当する。掘削露出観察法とは、調査対象杭の周辺地盤を掘削した後に杭頭周辺を直接目視観察する方法である。

コンクリート杭の代表的な非破壊調査法として、衝撃弾性波法がある。この方法は、コンクリート系の杭の施工直後の品質管理<sup>2)</sup>を目的として開発され

たことから PIT (Pile Integrity Test ; 杭の健全度試験)ともよばれている。杭頭部をハンマーで打撃して弾性波を与え、測定した波形から反射波を検出することにより破損の有無を知ろうとする方法である。この方法の利点として、測定機器が軽量・小型であること、結果がリアルタイムで得られること、繰返し測定が容易であることが挙げられる。杭頭部が露出している場合には、長所が発揮され短期間に多数の杭が調査可能であり、掘削露出観察法と併せて、1995年兵庫県南部地震で多く適用された<sup>3), 4), 5)</sup>。

しかし、この方法には原理的にいくつかの欠点がある。第1に、基礎構造の上から杭頭部の破損を検出することは極めて困難である。第2に、杭頭部を露出させても、杭が杭頭部で基礎構造と結合していれば、結合部が境界となる反射波の影響のため破損位置の判断が困難な場合も少なくない。第3に、杭の地中部に顕著な反射面すなわち破損の程度の重度な箇所があれば、上方の杭頭部や結合部の反射面との間での繰返し反射現象のため、それより下方の破損部の検出が極めて困難である。

#### b) AE手法による破損度調査法の特徴と開発目的

この手法の目指すところは、実質的な杭の支持性能をおびやかすような重度の破損の有無を、非破壊調査法として杭の深さ方向にもれなく把握することにより、基礎の復旧の方針を合理的に選択するための手段を提供することである。

なお、本論文で主に検出対象とする破損とは、せん断破壊や杭体を貫通する曲げひび割れである。また、検出可能な破損とは、少なくとも一度は杭周辺地盤の土砂が流れ込むような(1mm以上の)開口を経験した曲げひび割れか、もしくは、ひび割れた後の亀裂面が擦れることを経験したひび割れ以上の破損であると考えている。

## (2) 調査方法

### a) AEパラメータ解析の方法

AEの解析には、目的、計測方法、解析項目などの違いにより、パラメータ解析と定量的波形解析の2つの方向性がある<sup>6)</sup>。前者のパラメータ解析は、検出したAE波形に信号処理を施して得られるパラメータを抽出しそれを評価するもので、一般化とパッケージ化が進み、リアルタイムで結果が得られるという利点がある。本調査法では波形計測も併用するが、パラメータ計測を主体に考えている。

本論文で適用する杭の破損度調査法とは、コンクリート杭の破損した部分から射出されると考えられるAE(Acoustic Emission:アコースティックエミッション)を利用し、これを計測することによって

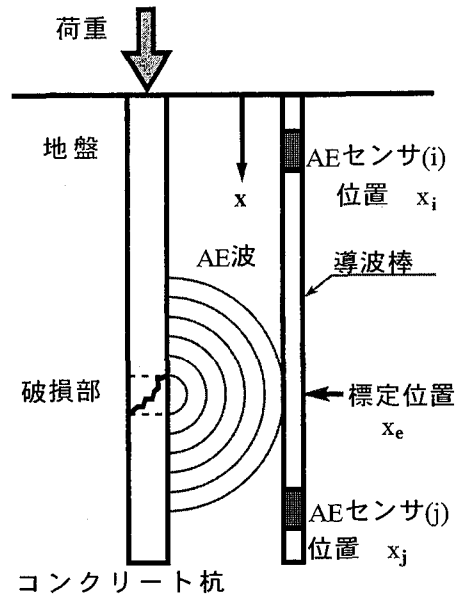


図-1 AE破損調査法 の概念図

破損の有無、破損の位置、破損の程度を検出しようとするものである<sup>1)</sup>。

図-1に本調査法(以下、AE法と称す。)の概念図を示す。破損が予想される杭に近接させて、複数のAEセンサーを取り付けた導波棒が破損予想部分を覆うように設置し、破損部から射出されるAE信号を導波棒を介して検知するものであり、各センサーでの検知時間の差によってその位置を1次元的に標定するという検出原理である。

すなわち、センサー*i, j*が $x_i, x_j$ の位置にあり、同一AE源によるAE波初動到達時刻(ART)を $t_i, t_j$ とすると、導波棒内のAE波の伝播速度が $v$ であるとき、標定位置 $x_e$ は次式のように決定される。

$$x_e = (x_i + x_j) / 2 - (t_i - t_j)v / 2 \quad (1)$$

$x_i, x_j$ は既知であり、地盤内の伝播速度より大きい導波棒内伝播速度 $v$ さえ予め測定しておけば、到達した時刻は計測されるので、式(1)により、破損位置が1次元的に標定できる。

### b) AEセンサー

AEセンサーは、室内実験と現場実験の結果を踏まえ、新たに製作した。共振周波数60kHzのPZT圧電素子を用いた40dBのプリアンプ内蔵型のセンサーとし、工場加工の防水耐圧仕様とした。また、AEセンサーから伸びる計測ケーブルは耐久性の高いキャプタイア製とし、長さ40mの杭に対応できる長さとした。

### (3) 調査法成立のために解決すべき課題と解決策

#### a) 調査法成立のために解決すべき課題

先の論文<sup>1)</sup>で述べた仮説と仮定の成立を確認することが調査法成立のための理論上の課題であり、迅速化と低コスト化が実用化を目指した場合の開発の課題であると考えられる。

先の論文で述べた「破損部から射出される AE の発生の確認」という課題<sup>1)</sup>は解決されず残されていたが、本研究で解決する。破損部の認識とその位置標定に重点を置いて議論するものとする。先の論文で示した「破損の程度の把握」という課題<sup>1)</sup>は、今後の課題とする。

#### 【実用上の課題】

課題 1: カイザー効果により AE 発生が期待できないときの、AE の誘発方法の開発

課題 2: コストの低減と信頼性の維持

課題 3: 調査の迅速化と操作性の向上

課題 4: 調査の標準化と高度化

現場実験<sup>1)</sup>では、手法の検証を目的としたため、最も信頼性の高いと考えられる方法で実施した。すなわち、地盤と導波棒の一体化を完全なものとするとともに、導波棒への AE 波動の入射をより高めるために、導波棒をポアホールに建て込んだ後にベントナイトとセメントの水溶液を注入・充填し、固化させて設置した。この方法では、高価な AE センサーと導波棒が回収できないため、費用が高くなる。

#### (課題 2)

また、この現場実験で固化液充填後に AE を測定したところ、3日にわたる計測結果によれば、充填直後には全長にわたり連続的な AE が検出・位置標定され、時間の経過とともに導波棒下部より AE 活動度が低くなっていく様子が確認された。これは、孔壁からの土の降下や固化液の沈殿に伴う AE 現象であり、固化とともに安定してくるものと解釈できた。結果として、計測可能になった安定したバックグラウンドノイズ（以下 BGN と略す。）レベルになったのは固化液を充填した 1 週間後であった。（課題 3）

現場実験<sup>1)</sup>では、対象地盤がシルト地盤で杭破損の進行が緩速であったことと対象構造物が貯蔵構造物であったため、荷重の変動が見込めたことから、AE の活動度は高く、また継続した。しかし、好条件が見込めない場合には、AE を誘発させる方策を考える必要がある。（課題 1）

すなわち、信頼性のある程度保ちつつ、経済性と迅速性（操作性）に優れた導波棒の開発とカイザー効果が現れやすい条件下での AE の誘発方法の考案が、実用化の最大の課題である。後者については、

現場条件に応じて対処した。

#### b) 種々の方式の導波棒の開発

経済性や迅速性を向上させるために、いくつかの導波棒の設置・運用方法を考えた。図-2に種々の導波棒の方式を示す。図-2(a)は前述の埋設固化方式である。図-2(b)は埋設砂充填方式であり、充填した砂が安定するために固化方式と同様な養生時間を要するが、導波棒が短い場合には回収可能である。図-2(c)は挿入水充填方式であり、水を AE 波の伝播媒体と見なせるという仮定に立っている。長所としては、完全な回収が可能なことと AE 活動度が高ければ時間を要しないことであるが、孔壁が安定するまで待つ必要がある。図-2(d)はサスペンション方式であり、挿入水充填方式の考え方をさらに進めたもので、清水を充填したポアホール中で短い導波棒を上下に移動することによって、AE 波を捉えようとするものである。さらに経済性と迅速性を高めることができる。図-2(e)は先端コーン型貫入方式であり、ボーリングが不要となり、また回収も可能なものである。しかし、貫入と引き抜きに専用の機械を必要とする。軟弱地盤中の杭基礎に対して有効と考えられるが、本研究での適用現場では瓦礫が多かったため用いられていない。

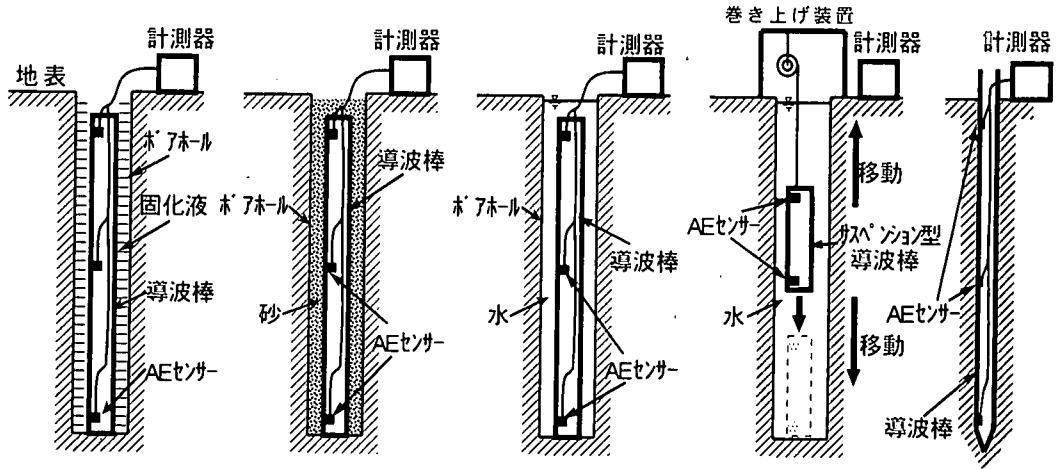
導波棒の材料としては、減衰の小さい鋼またはアルミニウムを利用している。AE センサーや信号計測ケーブルの保護などを目的として、厚肉の管を利用している。平坦面と内径と同じ曲率の曲面を有する側面の柱体を管内部に固着し、平坦面に真空シリコングリースを介在させ固定ねじにより機械的に AE センサーを圧着している。(c)と(d)の挿入式は可搬性を考えて考慮しアルミニウム管を、(e)の貫入式は耐久性を考慮して鋼管を用いている。(a)と(b)の方式はどちらでもよい。

また、いずれの導波棒も、1.5-2.0m の両端をねじ溝に加工したユニットロッドをつなぐ形式とし、現場作業に対応した可搬性の高いものとした。

#### c) 水充填方式導波棒に関する事前考察

ここで、(c)と(d)の場合には、地盤と導波棒以外に水という異なる媒体が伝播経路上に存在することが問題となる。破損部から射出される AE 波は実体波であると考えられるが、P 波と S 波のいずれの波動が卓越するのかわからない。AE センサーの上述の検出特性を考えれば、卓越する実体波がたとえせん断波である S 波であっても、伝播中や導波棒入射時に SV 波が変換された P 波を検出することになる。すなわち、導波棒と地盤の間に水を介在させるということは、P 波を計測することを意味する。

さらに、(c)と(d)では、地盤によっては孔壁保護



<p>手順：ポアホール削孔 導波棒挿入 固化液注入 固化養生 計測</p> <p>棒：埋殺し 長所：信頼性高い 短所：時間を要す 費用が高い</p>	<p>手順：ポアホール削孔 導波棒挿入 砂投入 安定養生 計測</p> <p>棒：(回収可能) 長所：信頼性高い 短所：時間を要す 回収不能となる こともある</p>	<p>手順：ポアホール削孔 水注入 導波棒挿入 計測</p> <p>棒：回収 長所：時間要しない 費用が安い 短所：検証して いない</p>	<p>手順：ポアホール削孔 水注入 導波棒挿入・ 移動 計測の繰返し</p> <p>棒：回収 長所：時間要しない 費用が安い ハンドリングが容易 短所：AE活性度に依存</p>	<p>手順：導波棒貫入 計測</p> <p>棒：回収 長所：費用が安い 短所：貫入と引抜 に機材が必要</p>
--	---	--	--	---

(a)埋設固化 (b)埋設砂充填 (c)挿入水充填 (d)サスペンション (e)先端コーン型貫入

図-2 AE計測のための種々の導波棒の方式

のためにケーシングが必要になる場合もある。この場合には、鋼製のケーシングと水が地盤と導波棒の間に介在することになる。伝播形態は複雑となるが、一旦水まで入射すれば、音響インピーダンスの関係からケーシング内にAE波動は閉じこめられ、結果として効率の良い導波棒となる可能性もある。

以上の事前考察で、導波棒としての可能性は低いことから、室内実験や理論解析をすることなく、直接、現場で適用することを試みた。

図-2に示した各方式には、信頼性、経済性、迅速性、操作性などの各観点から、一長一短の特徴を有し、実用上は、個別の計測目的に応じて使い分けことが考えられる。いずれにせよ、本節で各方式の適用性について具体的に報告し、議論する。

### 3. 開発手法と提案導波棒の現場での適用

#### (1) S建物基礎への適用と検証

##### a) 建物概要と調査概要<sup>7), 8)</sup>

調査対象は、1995年の兵庫県南部地震で被災した兵庫県宝塚市の共同住宅である。S建物は1967

年に竣工した6.6m×46mの平面寸法を有する5階建てRC壁式構造の建物で、直径250mmのRC杭119本に支持されていた。上部構造に大きな損傷がない状態で全体が傾斜し、長辺方向に11.0cmの相対沈下が確認された。図-3にS建物と地盤の概要を示す。地盤は図の右側に下がる傾斜地に盛土造成した地盤である。なお、計測期間(1995年7月12日～7月19日)は、アンダーピニングによる復旧工事の施工中であり、工事に伴う基礎杭への荷重再配分によるAEの発生が期待された。図-4に計測時のアンダーピニング工事進捗状況を示す。

AE計測は、両端にAEセンサーを取付けた外径114mm、長さ6.0mの導波棒を直径165mmのポアホールに挿入し、12～13日にボーリングに用いた外径165mmのケーシングを残したままの水充填方式による計測を、13～19日に砂充填方式による計測を実施した。計測対象は、方式の交替に要する時間を除く概ね全時間である。図-5に主な対象杭と導波棒の位置関係を示す。

なお、杭の長さが不明で、地盤柱状図より杭先端位置をGL-6m程度と推定し調査対象を6mとした。

建物概要

平面寸法：46m×6.6m  
 階数：地上5階  
 構造形式：RC壁式構造  
 基礎構造：φ250 RC杭  
 被災状況：相対沈下 110mm

地質

1. GL0～5m 盛土(礫混り砂)  
 N値 0～10  
 2. GL-5m～ 風化花崗岩  
 N値 50以上

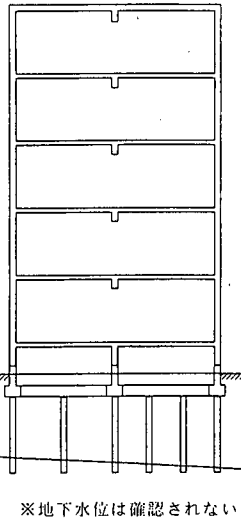
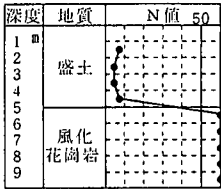


図-3 S建物と地盤の概要

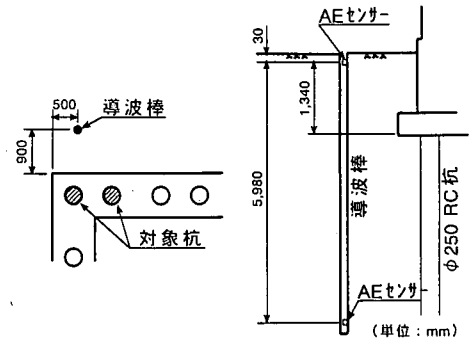


図-5 主な対象杭と導波棒の位置関係

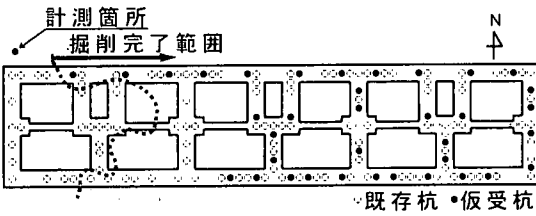


図-4 計測時のアンダーピニング工事進捗状況

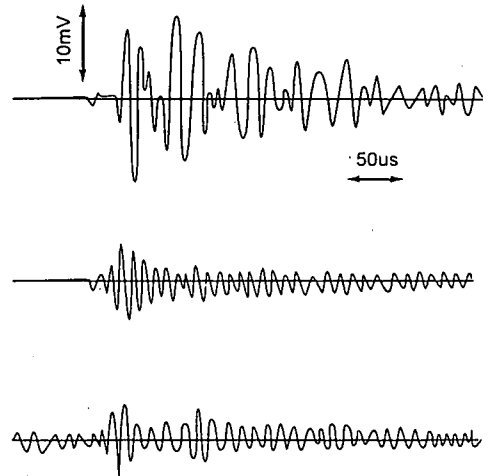


図-6 有意と判断された AE 波形の一例

b) AE法の現地解析と調査速報の結果

本調査の特徴としては、杭を掘削露出した後に実施する観察および第三者による衝撃弾性波法（PIT）の前に、調査依頼者に AE 法による調査速報を提出するブラインドテストとして位置づけられたことである。

AE 計測と位置標定の結果はリアルタイムで得られるが、現場計測では様々なバックグラウンドノイズ（BGN）があるため、客観的な結果を出すにはノイズフィルタリング処理が必要となる。しかし、7月14日早朝に速報提出が求められていたため、現地解析は、12日の復旧作業終了後に波形をモニターしながらノイズ波形を識別し、2時間の計測によるわずかに数10イベントデータに基づき、明らかに有意な AE 波形を示すイベント（EV）のうち AE 発生源の規模情報を与えるリングダウンカウント（RC）（1イベント中でしきい値を超えるピークのカウンタ数）が相対的に大きな AE が標定された深さとして破損位置を特定した。図-6に有意と判

断された AE 波形の一例を示す。また、図-7に判断根拠の1つとなった現場での位置標定結果を示す。現地解析では、①杭頭部付近、②杭頭より1.0m付近、③杭頭より2.2m付近、④杭頭より3.5m付近という4箇所の破損が推定され、その結果を速報として依頼者に提出した。なお、13日から砂充填方式に移行したが、充填した砂が安定するまでの挙動に伴う AE の発生が著しくノイズレベルが大きいため速報には反映していない。

c) 掘削露出観察と衝撃弾性波法の結果

AE 計測終了後、対象杭周辺が杭頭から深さ1.6mまで掘削されたため、基礎杭の掘削露出観察を実施した。なお、調査対象杭は図-5に示す導波棒設置位置近傍の2本とした。目視観察の結果、杭頭接合部のずれや、杭頭から1.0m付近にひび割れが確認さ

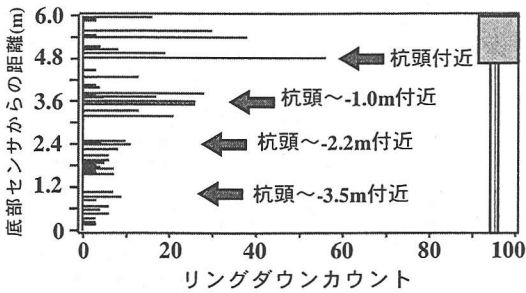


図-7 現場でのAE位置標定結果 (1995.7.13)

れた。また、後日第三者によって実施されたPITの結果では、杭頭から3.2m、5.4mにひび割れを有することが推定された。

d) AE法の調査詳細解析の方法と結果

計測されたAEデータには、復旧工事に伴う電気ノイズなどが含まれた。また、断続的に発生するスパイクノイズ(電気ノイズの一種)やテレビ・ラジオ・無線によると思われる電波ノイズも認められた。

そこで、手法の客観的な運用を図るため、以下に示す条件でノイズフィルタリング処理を行い、AE信号を抽出した。

- ①工事時間外計測データの選択。(合計16時間)
- ②RCが2以下、立上り時間が2μs以下の特徴を有するスパイクノイズを除去。
- ③継続時間が2,000μs以上の特徴を有する電波ノイズを除去。

②は工事用の機器・電灯などの電源のON・OFFと関わっており、その際の特徴から設定した。③は、建物住民が無線やテレビなどを使用しているときに発生していたAE記録の特徴であったので、そのような特徴の信号は全て使用しなかった。以上の処理を施すことを詳細解析と呼ぶ。図-8に水充填方式の場合の詳細解析の位置標定結果を示す。この図はBGNレベルの低い復旧工事作業開始前の時間帯の良質なデータを対象としている。図の縦軸は杭頭からの深さ、横軸は各々の深さで検出されたAEの1EV当たりの平均RC(各区間のRC累計量を区間全EV数で除した値)である。

その結果、①杭頭より0m~0.7m、②杭頭より約1m、③杭頭より1.7m~2.4m、④杭頭より約3.5mの4箇所が破損しているものと推定された。

なお、復旧工事作業時間帯は、特に掘削作業面以下の深さでEV数が1オーダー上の数となり、また、平均RCも2~10倍となり、破損部からの信号が隠れてしまうほどに、他に起因するAEが多く発生し、前述のフィルタリング処理だけでは破損位置は

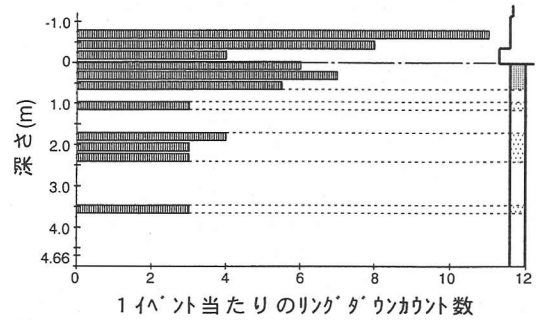


図-8 水充填方式の場合の詳細解析による位置標定結果

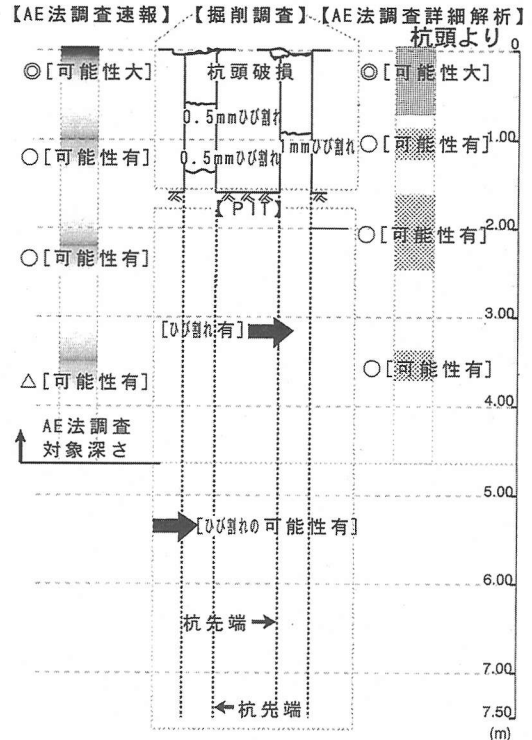


図-9 AE法現地解析、掘削露出観察、衝撃弾性波(PIT)およびAE法詳細解析の結果一覧

特定できなかった。

また、砂充填方式は、現場の環境から十分満足できる条件での測定ではなく、上記のようなフィルタリング処理を実施したが、破損位置は特定できなかった。

e) 各調査法の比較

図-9にAE法現地解析、掘削露出観察、PIT、AE法詳細解析の結果を併せて示す。この図で、「可能性あり」とは、有意と判断できるAE信号が少ないが可能性があることを意味する。「可能性大」とは、有意と判断できるAE信号が多くほぼ確実に破損があることを意味する。また、掘削調査法の対

象は掘削面より上位であり、PITの対象は掘削面より下位である。

AE法による現地解析の推定破損位置と詳細解析の推定破損位置はほぼ一致する。このことから、AEパラメータ計測結果を客観的なノイズフィルタリング処理により評価される詳細解析による破損位置標定は、波形をモニターして経験的に有意なAE信号と判断できるBGNレベルの低い良質なデータに基づく判定結果と同等の結果が得られることがわかった。

また、AE法調査による推定破損位置は、杭頭から2m付近を除き、目視観察の結果およびPITの結果の両方の結果にほぼ一致していることから、AE法の妥当性が確認された。

しかし、AE法調査で推定された杭頭から2m付近の破損については、PITでは認められなかった。推量ではあるが、この原因を考察する。PITでは、杭側面を鉛直に打撃する場合、発生する弾性波は下方と同様に上方へも伝播する。したがって、打撃点をセンサーとほぼ同位置とすると、センサーと破損位置の間の距離aがセンサーと杭頭間の距離bより小さい場合は、破損部からの反射波と基礎と結合した杭頭部からの反射波が干渉することが考えられる。検出が困難となったのは、このためであると考えられる。

#### f) S建物への適用から得られた結論

S建物の杭基礎にAE法を利用した結果および掘削露出観察とPITの結果との比較検討から次のことがわかった。

- ①水充填方式の導波棒を用いたAE法の推定破損位置は、掘削露出目視観察およびPITで認められた破損位置と概ね一致し、AE法の現場での適用性が裏付けられた。
- ②AE法では、簡単なパラメータ計測でも適切なノイズフィルタリングを行って得られる客観的な判定は、AE技術者の波形モニターによる破損位置推定と同等な結果が得られた。
- ③PITでは検出できなかった箇所において、AE法では破損の可能性を推定できた。
- ④十分な養生期間を置かない砂充填方式の導波棒はノイズが多く、AE法には適していない。
- ⑤AE法の現場への適用に際しては、計測段階での外来ノイズ対策が重要であり、今後の課題である。

#### (2) A建物基礎への適用と検証

##### a) 建物の概要と調査概要<sup>9), 10)</sup>

調査対象は、1995年兵庫県南部地震で被災した神戸市中央区の施設付共同住宅であり、地下1階、

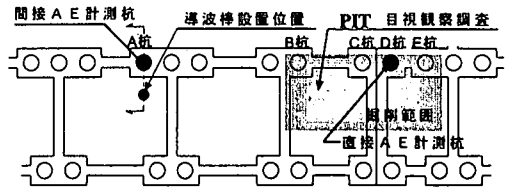


図-10 A建物の基礎梁と杭配置の平面図と計測位置

地上10階の高層建物である。A建物は1965年以前に建設された平面寸法21m×66mのRCラーメン構造の建物で、直径1100mm長さ10.5mの場所打ちコンクリート杭に支持されていた。上部構造は中間階の柱が座屈するなどの大きな被害を受けた。

なお、調査時(1995年10月)には既に建物上部は解体・撤去され、フーチング以下の基礎を残すのみであった。

この建物については、AE法、掘削露出観察、PITの3種の調査を実施した。調査期間の制約から、掘削を伴わないAE法の計測と掘削を伴う掘削露出観察とPITは、近接した異なる杭を対象として、平行して実施した。

なお、AE計測期間と掘削調査とPITの実施期間は2日間であり、ボーリングなどの準備工も含めた調査期間は7日間であった。

##### b) AE法による調査・計測方法<sup>11)</sup>

ここでは、S建物における水充填方式の適用性を確認したことを踏まえ、導波棒をサスペンション方式で実施した。導波棒は長さを5mとした外径80mmのアルミ製中空棒の両端にAEセンサーを内蔵したものである。

図-10に建物の基礎梁と杭の平面図および計測位置を示す。計測位置を外径96mmのケーシング掘りにより削孔し、ケーシングを残し、スライム沈降等に起因するAEを避けるため、計測前に2日間の養生期間を設定した。図-11に調査地盤の柱状図と導波棒挿入孔の断面図を示す。地盤は、地表から3mまでがシルト質砂の埋立土、6mまでが緩い砂、6～7m(杭頭から3.5～4.5m)にN値30以上の密な砂礫層があり、以深はシルト質の砂層である。6～7mの砂礫層の上下は相対的に軟らかく、杭は軟硬の土層を貫いているのが特徴的である。

サスペンション型導波棒では、計測対象範囲が導波棒長より広い場合には対象範囲を網羅できるように導波棒を移動して計測する必要がある。ウインチによる昇降装置により導波棒を吊り下げて、計測孔内の任意の位置に設置することとした。ケーシング内に清水を充填し、サスペンション型導波棒を吊り下げて、図-11に示す上ゾーン、下ゾーンの2ゾーン

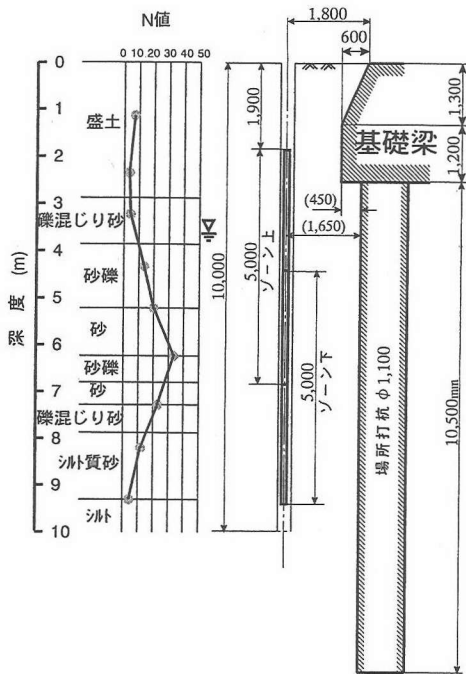


図-11 A建物調査地盤の柱状図と導波棒挿入孔の断面図

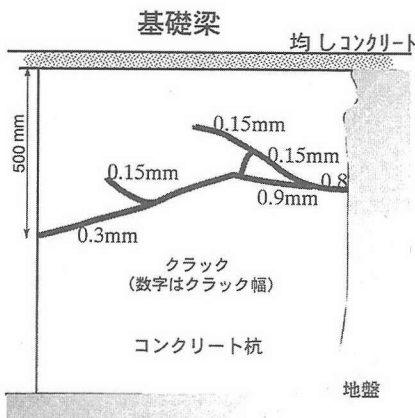


図-12 露出杭頭観察結果の一例 (A建物, D杭)

を設定して計測した。ゾーンのラップ長を半棒長(2.5m)とした。

### c) 破損部からのAEの誘発方法

このA建物のように、被災後に上部構造が撤去されている場合には、被害を受けたときに杭に作用していた上部構造自重に起因する鉛直軸応力のほとんどが解放されている。すなわち、上部構造撤去後の杭の破損部は、破損時に作用していた応力よりも極めて低い応力レベルにあるので、カイザー効果によりAEの発生は望めない。そこでAEを誘発させ

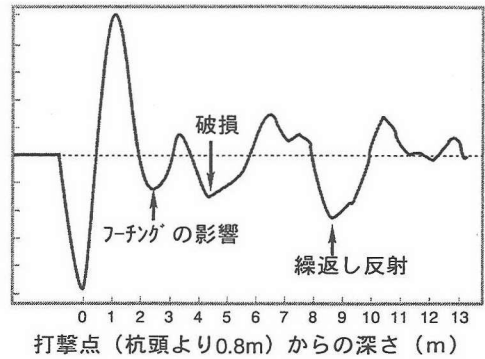


図-13 A建物C杭の衝撃弾性波法より得られた波形

るため、何らかの荷重や衝撃を杭に与える必要がある。ここでは、露出させた基礎梁上部に重機(バックホウ)を載せ、水平3方向でのアーム伸縮による繰返し荷重やアームを利用した重機の落下による衝撃荷重などにより、AEを誘発させ計測した。

### d) 露出杭頭観察結果

図-12に一例としてD杭の杭頭のスケッチ図を示す。杭頭から約50cm深さに幅0.15~0.9mm程度の斜め円周方向に卓越し軸方向にも伸びるクラックが確認された。A杭には杭頭から16~14cm下方に幅0.25mm長さ60cmの斜めのクラックが、B杭には杭頭から62cm下方に幅0.35mmの周方向のクラックと3方位に軸方向に杭頭から下方に続く幅1.2~3.5mmのクラックが確認された。また、割栗石や均しコンクリートと杭の間には剥離は見られず、結合状態はよかった。

すなわち、杭頭の観察結果によれば、いずれも杭頭付近にクラックが発生していることがわかった。

### e) 衝撃弾性波法による調査結果

図-13に一例としてC杭のPITにより得られた波形を示す。図の横軸は打撃点からの深さ(杭頭下方0.8m)を表している。図-13から2.4m、4.2m、8.6mに反射波と推定される位相が認められた。前の2つは破損部からの反射波、3つ目は杭先端からの反射波と解釈できる。すなわち、C杭では杭頭より3.2mと5.0mに破損部があると推定される。また杭長は9.4mであると推定される。同様な推定結果によれば、A杭は健全性が高く、杭長は9.8mである。B杭は杭頭より8.0mに不明瞭な反射波があったが不明確である。D杭は杭頭より3.5m付近に破損があり、杭長は10.2mである。すなわちPITによれば3.2m(C)、3.5m(D)、5.0m(C)に破損があることがわかった。



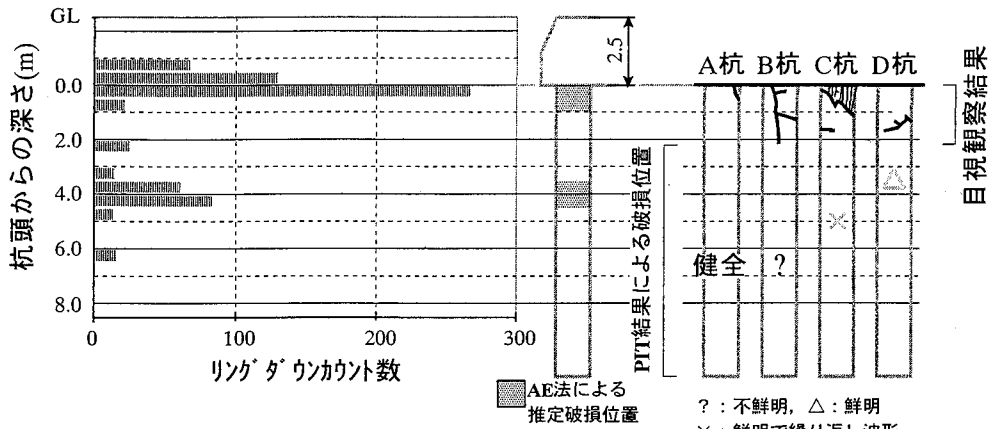


図-14 A 建物の AE 法調査結果および目視観察と衝撃弾性波法の調査結果

f) AE法による調査結果

図-14に AE 計測結果を示す。図の縦軸は深度、横軸は各々の深度における累積 RC である。図-14より、AE の累積 RC の大きい箇所として、①杭頭付近、②杭頭より 3.5m ~ 4.5m の 2 箇所が明瞭に判別できる。この 2 箇所 で杭が破損していることが推定される。また、2.2m 付近と 6m 付近にも AE が認められるが、RC の大きさなどから考えて、破損であるとは判定しにくい。

これらの 2 つの推定破損深度は、同一の杭ではないが、杭頭観察によって確認された杭頭付近のクラックの深さと PIT により推定された 3.2 ~ 3.5m の破損推定深さに合致している。また、AE 法と PIT の両方で推定された 3.5m 付近の破損位置は、前述の剛性の異なる地層境界に相当しており、地層境界近傍で地震時応力が増大するというこれまでの地震工学上の知見とも符合する。このことから、これら両者の推定結果は信頼性の高いものと考えられる。

結果を理解しやすいように、図-14には目視観察と衝撃弾性波法の調査結果を併せて示してある。

g) A建物への適用から得られた結論

A 建物への適用から、次の結論が得られた。

- ① 本手法は比較的軽度の破損においても、他の手法と同等の精度で破損位置検出が可能である。
- ② サスペンション方式導波棒は有効であり、現場適用性がある。
- ③ 重機自重などの一時的荷重によっても、計測可能な AE が誘発される。
- ④ 杭の破損は、剛性の異なる地層境界付近で生じている可能性が高い。

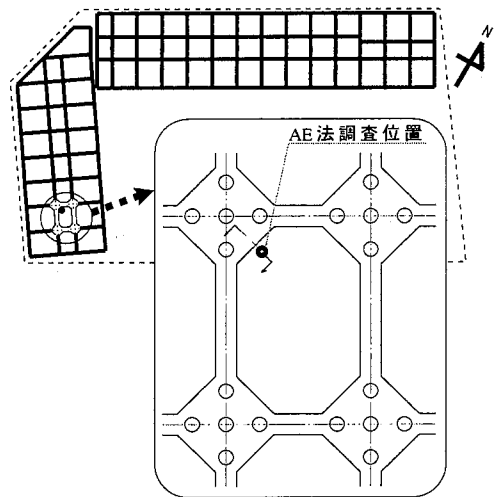


図-15 T 建物の基礎平面図と調査位置

(3) T建物基礎への適用

a) 調査の概要<sup>1,2)</sup>

T 建物は、神戸市中央区にあり、1958 年以前に建設された地上 5 階、地下 1 階の施設付共同住宅である。構造はエキスパンションジョイントにより 2 棟に分かれる RC ラーメン構造であり、平面形状は、約 60m × 15m の長方形である。基礎構造は、基礎梁で連結された独立フーチングの杭基礎であり、杭は直径 350mm 長さ 3.0m の RC 杭である。図-15に T 建物の基礎平面図と調査位置を示す。

図-16に T 建物の地盤柱状図と杭深さおよび導波棒位置を示す。この地盤は、地表から -3.4m までが礫混り砂の盛土、-4.9m までが砂礫層、-4.9m 以深は N 値 20 以上の砂層からなる。

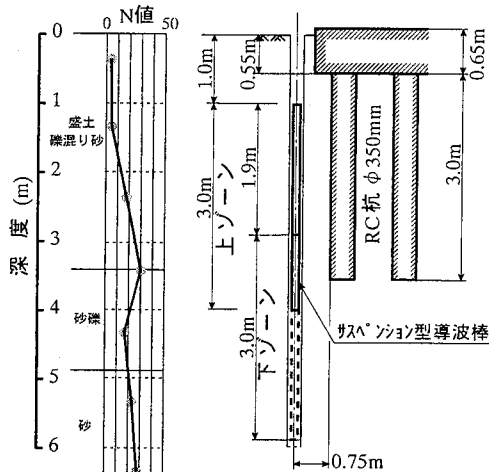


図-16 T建物の地盤柱状図および杭と導波棒位置

AE法調査時（1995年11月）には建物上部は既に解体・撤去され、フーチング以下の基礎を残すのみであった。なお、AE法調査に先立ち別途実施された一部の掘削観察によれば、調査位置は異なるが、杭頭50cm以内には損傷は認められていない。

なお、S建物とA建物の基礎杭に対するAE法の適用性が実証されたので、T建物では、AE法による調査のみとした。

#### b) AE法調査の概要

上部構造が撤去されていたので、A建物と同様に、露出させたフーチング上部に重機を載せて、同様な重機操作によりAEを誘発させた。また、導波棒には、長さ3.0mのサスペンション型導波棒を用いた。導波棒挿入用のボアホールは6mの深度まで外径96mmのケーシングにより削孔し、ケーシングを残し清水を充填した。図-16に示す上ゾーン、下ゾーンの2ゾーンとし、ゾーン間の重複を1.1mとした。なお、T建物についても計測期間は2日間、調査期間は7日間であった。

#### c) 調査結果

計測データには、計測器の供給電源と共用していた自動販売機の影響と考えられる電気ノイズや、計測中突発的に発生するスパイクノイズが含まれていた。これらのノイズは前述のノイズフィルタリング処理により除去して解析した。図-17にAE計測結果を示す。図の縦軸は深度、横軸は累積RCである。先の事例に比べて累積RCが大きいのが特徴である。図-17より、累積RCの大きい箇所として、①杭頭より0.5～1.0m、②杭頭より1.2～1.7m、③杭頭より2.0～3.0mが明瞭で容易に指摘できる。

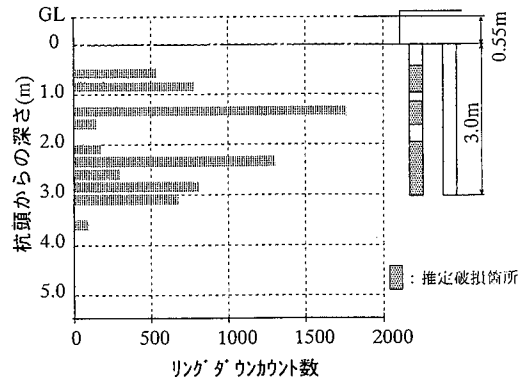


図-17 T建物の杭のAE法調査結果

杭頭部でAEが検出されなかったのは杭頭観察結果と符合する。また、深い部分については他の方法による調査を行っていないので検証はできない。

しかし、基礎杭の先端より深い地表から6.0mの深さまでAE計測を実施したが、有意なAEが検出された深さは設計杭長の範囲と概ね一致し、杭に相当する範囲以外の地盤からはAEが発生していないことが確認できた。このことは、AE法が破損度調査法として適していることの一面を表していると言える。

#### d) T建物への適用から得られた結論

有意なAEが検出された深さは設計杭長の範囲と概ね一致し、杭に相当する範囲以外の地盤からはAEが発生していないことが確認された。

### 4. 杭破損部から射出されたAE波形の計測

#### (1) 目的

ここでは、被災したA建物のコンクリート杭からAE波が射出されることを確認するために、被災した杭体にAEセンサーを直接設置して計測すること（以下、本章では直接計測とよぶ。）を試みた。破損部からのAE波射出の確認という残されていた課題を解決することが主な目的である。

導波棒による間接的なAE計測（以下、本章では間接計測とよぶ。）と比較することにより、地盤と導波棒を伝播することによる周波数特性の変化を見ることも目的である。

#### (2) コンクリート杭のAEの直接計測の方法<sup>1)3)</sup>

図-18に直接計測の対象としたC杭の状況とAEセンサーの設置箇所を示す。C杭には横断方向に0.15～0.9mmのクラックと杭頭表面のコンクリートの小剥落が認められた。AEセンサーは、杭頭よ

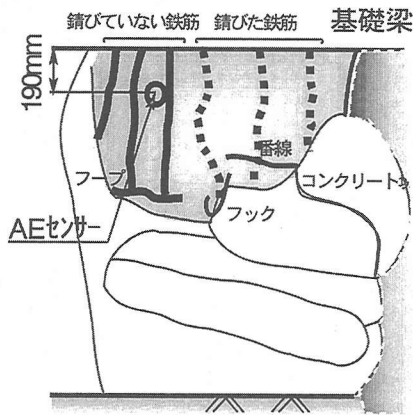


図-18 A 建物の C 杭の状況と AE センサーの設置位置

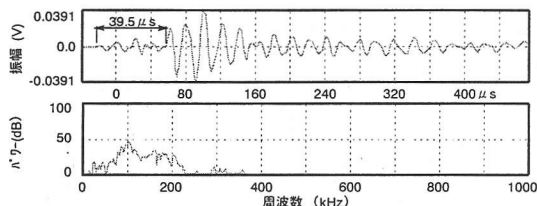


図-19 P 波と S 波の到達が明瞭に認識できる AE 波形の一例

り 19cm 下の杭表面に、真空グリースを介しゴムテープにより圧着した。導波棒による間接 AE 計測は前述の通りである。ただし、これらの目的のために AE 波形を計測した。

### (3) AE の直接計測の結果

#### a) 杭破損部から射出された AE 記録の確認

直接 AE 計測した AE 記録中、ノイズでない有意な AE 波であると認識できた記録は、15 記録である。その時刻歴波形の中には、P 波と S 波の到達に相当する位相が明確に認識できる波形が 3 例あった。他の記録は主要動と思われる位相の前に振幅の小さい初動部が見られたが、その立ち上がりは確認できなかった。図-19 にその一例を示す。初動部の立ち上がり部と主要動部の立ち上がり部をそれぞれ P 波と S 波に相当すると考えると、P-S 時間からセンサーと AE 源との距離が求められる。P-S 時間  $T_{p-s}$  は約  $40 \mu s$  である。場所打コンクリート杭の P 波速度  $V_p$  を  $3.8 \text{ km/s}$ 、S 波速度  $V_s$  を  $1/2 V_p = 1.9 \text{ km/s}$  とすると、センサーと AE 源の間の距離  $L$  は、式 (2) より、 $L=15.2 \text{ cm}$  と求められる。

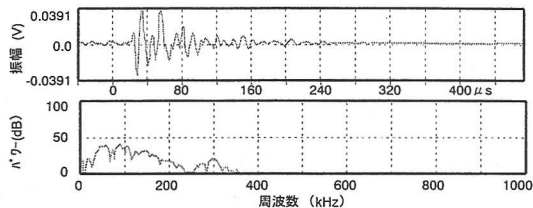


図-20 杭体に設置したセンサーにより直接的に計測された AE 波の時刻歴とパワースペクトル

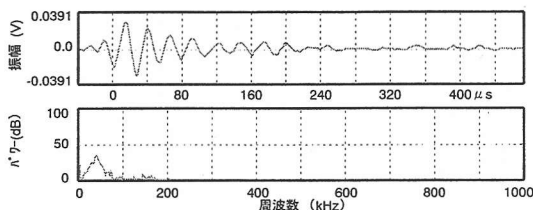


図-21 導波棒計測による間接的に計測された AE 波の時刻歴とパワースペクトル

$$L = T_{p-s} \times (V_s \cdot V_p) / (V_p - V_s) \quad (2)$$

一方、実際のクラックまでの杭表面上の距離は、幅  $0.15 \text{ mm}$  のクラックまで  $4 \sim 10 \text{ cm}$ 、幅  $0.3 \text{ mm}$  のクラックまで  $11 \sim 20 \text{ cm}$ 、幅  $0.9 \text{ mm}$  のクラックまで  $30 \sim 50 \text{ cm}$  である。厳密な議論はできないが、幅  $0.3 \text{ mm}$  のクラックから射出された AE 波である可能性が高い。

AE 波の振幅の大きさと閾値 (THV) の関係からトリガーされる時刻が決定されるため、ディレイタイムの短い計測装置で P 波を捉えるのは一般に困難である。したがって、上述した記録とその分析から、直接計測により得られた有意な AE 波はいずれもクラックから射出されたものと考えられる。

#### b) 直接計測と間接計測による AE 波形の違い

図-20 に直接計測により得られた 1 つの AE 波の (a) 時刻歴と (b) パワースペクトルを示す。図-20 より、杭破損部より発せられる AE 波形は立ち上がり鋭く、 $5 \sim 230 \text{ kHz}$  の広い周波数範囲に有意な成分を持つという特徴を有することがわかる。波形の立ち上がりから  $40 \mu s$  の間振幅の大きな主要部が続く。図-21 に導波棒による間接計測により得られた 1 つの AE 波の (a) 時刻歴と (b) パワースペクトルを示す。図-21 (a) より、同一のイベントではないが、図-20 (a) と比べて、立ち上がりが緩やかで相対的に低周波数であることが、定性的に指摘できる。また、図-21 (b) の導波棒により得られた AE のパワースペ

クトルは、40kHzにピークを持ち5～80kHzの低い周波数成分しかない。波形の立上りが緩やかなのは有意な周波数成分が低周波数側の狭い範囲に限られていることから説明できる。

すなわち、これらのAE記録が直接・間接計測のAE記録を代表しているものと仮定すると、杭の破損部より射出されたAE波にとって、地盤と導波棒を伝播するということには、ローパスフィルターが作用する効果のあることが推量できる。

散乱などがなく一様媒体を伝わる時、同じ距離では高周波数ほど波数が多くなるため材料減衰による距離減衰は大きくなり、一般に高周波数ほど距離減衰は大きい。したがって、上述のローパスフィルター効果はこの一般論と整合する。

なお、直接計測と間接計測を同一のイベントで比較しないのは、計測機器の都合上、同時計測できなかったためである。

#### (4) S建物の杭体の直接計測より得られた結論

コンクリート杭の破損部近くの杭表面での直接計測および導波棒による間接計測結果との比較から、以下の結論が得られた。

- ① 直接計測したAE波形でP波とS波の到達時刻が確認された記録が得られ、P-S時間から求められる距離にクラックがあり、クラックから射出されたAE波であることが推定できた。
- ② 限られた記録であるが、杭破損部より発せられるAE波形は立上りが鋭く、5kHz～230kHzの広い周波数範囲に成分を有する。
- ③ 限られた記録であるが、導波棒により得られたAE波形は、40kHzを中心とする低周波数成分で構成され、波の立上りが緩やかである。
- ④ 以上の②③に基づけば、地盤と導波棒の伝播にはローパスフィルター効果があると推量できる。

## 5. 結論

新たに開発された、導波棒を用いたAE法によるコンクリート杭の破損調査法について、実際の現場計測に対応できるように種々の方策を立て、1995年兵庫県南部地震で被災したいくつかの建造物の基礎杭に適用した。限られた現場においてはあなが、得られた結論は次のように整理できる。

#### 【適用性】

- (1) S建物とA建物の基礎杭に対して、水充填方式やサスペンション方式の導波棒を用いたAE法を適用し、AE法の推定破損位置は、掘削露

出目視観察および衝撃弾性波法で認められた破損位置と概ね一致し、AE法およびこれらの導波棒の現場での非破壊調査法としての適用性が裏付けられた。

- (2) 掘削露出観察法と衝撃弾性波法の両方を併用して得られる結果を、AE法では単独で検出できることが確認できた。また、衝撃弾性波法では杭頭反射の影響のため検出困難な深さにおいて、破損の可能性があることをAE法では推定できなかった。ただし、個々の杭の判別はできない。
- (3) 杭先端より深い位置まで計測した結果、有意なAEが検出された深さは設計杭長の範囲と概ね一致し、杭に相当する範囲以外の地盤からはAEが発生していないことが確認された。
- (4) 重機自重などの一時的荷重によっても、計測可能なAEが誘発されることがわかった。
- (5) AE法では、簡単なパラメータ計測でも適切なノイズフィルタリングを行えば、客観的な破損位置推定の結果が、AE技術者の波形モニターによる破損位置推定の結果と同等な結果が得られた。
- (6) 十分な養生期間をおかない砂充填方式の導波棒は、ノイズが多くAE法には適していないことや、計測段階での外来ノイズ対策が重要であることがわかった。

#### 【仮説の検証】

- (7) 杭体において直接計測したAE波形で、P波とS波の到達時刻が確認された記録が得られ、P-S時間から求められる距離にクラックがあり、クラックから射出されたAE波であることが推定できた。
- (8) 破損杭を直接計測した結果と導波棒による間接計測結果を比較することにより、杭破損部より発せられるAE波形は立上りが鋭く、5kHz～230kHzの広い周波数範囲に成分を有する一方、導波棒により得られたAE波形は、40kHzを中心とする低周波数成分で構成され、波の立上りが緩やかであることがわかった。すなわち、地盤と導波棒のAE波伝播にはローパスフィルター効果があることが推量できた。

## 参考文献

- 1) 森 伸一郎, 塩谷 智基: 地震で被災したコンクリート杭に対する AE 法による破損度調査法の開発, 土木学会論文集, No.605 / I-45, pp.61-77, 1998.10.
- 2) 松本 樹典, 村上 浩: 施工された既製コンクリート杭の非破壊検査, 建築技術, pp.139-150, 1990.12.
- 3) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 1995.12
- 4) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会: 兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書, 1996.7.
- 5) 松井 保, 南荘 淳, 安田 扶律, 仲田 慶正, 今田 和夫: 非破壊試験による基礎杭損傷調査における解析手法の開発と適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.596 / III-43, pp.261-270, 1998.6.
- 6) 日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッションⅡ, 日本非破壊検査協会講習会資料, pp.1-203, 1995.
- 7) 森 伸一郎, 岩城 圭介, 塩谷 智基, 境野 典夫: AE を利用したコンクリート杭破損調査法の中層建物への適用と検証, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1695-1696, 1996.7.
- 8) 森 伸一郎, 岩城 圭介, 塩谷 智基, 境野 典夫, 秋山 映雄: AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の中層建物基礎への適用と検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.639-640, 1996.9.
- 9) 森 伸一郎, 塩谷 智基, 岩城 圭介, 境野 典夫: 誘発させた AE を利用したコンクリート杭破損調査法の実建物への適用, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1697-1698, 1996.7.
- 10) 森 伸一郎, 塩谷 智基, 岩城 圭介, 境野 典夫, 田中 幹夫: AE を利用したコンクリート杭破損調査法の高層建物基礎への適用と検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.643-644, 1996.9.
- 11) 岩城 圭介, 森 伸一郎, 境野 典夫, 塩谷 智基: AE を利用したコンクリート杭破損調査法におけるサスペンション型導波棒の適用, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演梗概集第Ⅲ部, pp.32-33, 1996.9.
- 12) 森 伸一郎, 境野 典夫, 岩城 圭介, 塩谷 智基, 小堀 隆治: AE を利用したコンクリート杭破損調査法の短杭構造物への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.641-642, 1996.9.
- 13) 塩谷 智基, 森 伸一郎, 岩城 圭介, 境野 典夫: コンクリート杭破損部から放射された AE 波形の特徴, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演梗概集第Ⅲ部, pp.30-31, 1996.9.

(1999. 5. 21受付)

## APPLICATIONS OF A DAMAGE INSPECTION METHOD USING AN ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE TO SEVERAL CONCRETE PILES DAMAGED DURING THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE

Shin'ichiro MORI, Tomoki SHIOTANI and Keisuke IWAKI

The new damage-inspection method for concrete pile using AE technique proposed by Mori and Shiotani(1998) was applied to several pile foundations damaged during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. In this paper, the development of portable suspended wave-guides and their application results are discussed compared with the result of conventional inspection methods. The comparison verifies the effectiveness of the proposed method. Furthermore, the comparison between direct AE measurement on pile and indirect measurement with wave-guide suggests the characteristics of AE wave transformation through ground.