

# 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

森 伸一郎<sup>1</sup>・塩谷 智基<sup>2</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番)

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

構造物が強い地震動を受けた場合、上部構造は地震直後に外観の目視により被害調査がなされるのに対して、基礎構造、特に杭基礎については、明らかに杭に被害があるという場合を除いて調査がなされないことが多い。さらに、地中深部の杭の状況が調査されることは極めて稀である。杭の耐震安全性評価や杭の耐震設計法の向上のためにも、杭の被害調査法の開発が望まれている。著者らは、地震時に生じた破損部から射出されるAE波を利用した、コンクリート杭の非破壊試験としての破損度調査法を考案した。本論文では、方法の原理、背景、仮説を述べ、室内実験で原理を検証し、大地震による杭被害が推測されている実構造物に本手法を適用し、現場適用性について議論した。

**Key Words :** *damage inspection, acoustic emission, concrete pile, nondestructive test, laboratory test, field test, wave guide, source location, earthquake*

## 1. はじめに

本論文は、地震で被災したコンクリート杭の破損部から射出されるAE波の位置標定を行うことによって、杭体を露出させずに破損の位置・程度を検出しようとする、新しい基礎杭の非破壊調査法を開発し、室内実験と現場実験により検証したものである。

土木構造物や建築物が強い地震動を受けた場合、地震直後に施設の管理者や技術者により目視観察がなされ、それに続いて構造部材や非構造部材の損傷の有無、位置、程度を確認するという被害調査と調査結果に基づいた復旧・補強の立案と実施が行われる。これらの技術は、既に震災復旧技術マニュアルとして、土木<sup>1)</sup>・建築<sup>2)</sup>の両分野で整備・普及されている。杭基礎で支持される構造物の調査に関して、これらのマニュアルでは、上部構造に関する規程が詳細なのに対して、基礎構造については、一般に掘削しないと発見できないという認識<sup>1)</sup>の下に、基礎の残留変位による判定や上部構造の被害と周辺地盤の変状から類推した判定<sup>1)</sup>、傾斜角の大きさによる判定<sup>2)</sup>が規定されているのみである。このことは有効な調査法の欠如を物語っている。

杭の有効な調査法の欠如は、地震後の被害調査のみならず、杭の耐震性に関する議論や研究の進展の妨げとなっている。杭の耐震設計法確立のためにも、有効な調査手法の研究・開発が望まれている。

著者らは、破損部から射出されるAE波の存在を仮説として想定し、それを利用した新しいコンクリート杭の破損度調査法を考案した。本論文では、はじめに杭の破損度調査の必要性を我が国の杭の利用と過去の震害の観点から議論するとともに、非破壊調査法の必要性について述べる。そして、本論文の主題として、開発した調査方法の原理、およびその発案の背景と仮説を述べた後、室内実験によってその原理的な可能性を示す。大地震によって杭が破損したと推定されている実構造物に本手法を適用した現場実験により、その現場適用性について検証する。これにより本手法を新しい杭の破損度調査法として提案するものである。

ただし、ここでは調査手法の成立を実証し、主に破損の有無、破損の位置に絞って議論するものであり、紙面の都合上破損の程度の定量的評価については議論の対象に含めない。

## 2. 杭の破損度調査の必要性

### (1) 我が国における構造物の基礎杭の現状

我が国では、多くの都市が沖積低地に位置しているだけでなく、臨海埋立地を造成するなどして都市が拡大している。そのような地盤では土木構造物や建築物の基礎として、杭・井筒・ケーソン・連続地中壁などが採用される場合が多く、中でも、最近では杭基礎が最も多い基礎形式である。

また、我が国の主要な都市では、1950年代後半から1970年代にかけて、いわゆる高度成長期に作られた建造物が多い。これらの既存構造物は、現在の耐震規程より古い規程に基づいて設計されているため水平耐力が相対的に低いと考えられている。

### (2) 杭の被害調査の現状と杭の被害形態

周知のように、我が国の耐震規程は多くの被害地震の経験と震害調査の集積を踏まえて改訂されてきた。しかし、その集積の多くは上部構造に関するものである。杭が構造部材としての認識の基に使用されてからの地震の経験は多くない。そのため、土木分野でも建築分野でも、多少の違いはあれ、上部構造物に比べて杭の被害調査例が極めて少ない。これは、一概に杭の被害が少ないとは言えず、被害調査例が少ないと捉えるべきであり、それは杭の被害調査が困難であることによると考えられる。

一般に、地震の後、上部構造については点検・調査がされることは多い。上部構造は破損度が外観から比較的容易に判断できるからである。一方、基礎構造が調査されることは少ないが、被害発見の困難さ、機能上・景観上の必要性の乏しさ、調査の経済的・技術的問題などが、基礎構造の調査例の少ない理由であると考えられる。

本格的な基礎の調査としては、土木分野においては1964年新潟地震での被災した橋梁基礎の杭の掘り出し調査<sup>3)</sup>、建築分野においては1978年宮城県沖地震での上部構造が傾斜した杭基礎の掘削調査<sup>4)</sup>が挙げられる。水野<sup>5)</sup>によれば、これまでの地震被害から杭の被害形態としては、上部構造の慣性力に起因する杭頭周辺の曲げやせん断破壊あるいは地震時の杭の分担率の変化に起因する増加軸力による圧壊などがある。これら被害調査事例の多くは、地表面から深くない杭頭付近の事例であると言える。

しかしながら、1964年新潟地震では、地震直後の調査により地中深いところで杭が被害を受けていたことがわかった<sup>3)・6)・7)</sup>。さらに、この地震を経験した杭が、近年の改築工事の際に調査され<sup>8)・9)</sup>、やはり深部で被害を受けていることが明らかにされ

た。新潟市の杭深部の被害については、浜田ら<sup>10)</sup>が明らかにした液状化に起因する地盤の側方流動との関連が注目され、森ら<sup>11)</sup>は液状化した地盤の側方流動に起因する深部での曲げ破壊があること、吉田ら<sup>12)</sup>は新たな掘削調査により、同様な原因により同じく杭深部での曲げ破壊やせん断破壊とそれらに続く圧壊があったことを報告している。

また、1995年兵庫県南部地震においては、それ以前の地震被害とは比べようもないほど多くの構造物の被害が発生し、杭頭慣性力・地盤変位・液状化・側方流動に起因すると想像される杭被害が多く見られ、道路橋<sup>13)</sup>や建築物<sup>14)</sup>に関する杭の調査結果も公表されてきている。地中部における破損の例としては、橋脚基礎の場所打ち杭に、深さ17m付近で曲げ亀裂が発生したことがボアホールカメラで確認された例<sup>13)</sup>、深さ13-15mで曲げ亀裂が同様に確認された例<sup>15)</sup>が報告されているほか、建築物の既製コンクリート杭に数m~10数mの深さでひび割れが発生している可能性があることが弾性波探傷で確認された数例<sup>14)</sup>が報告されている。このように、10m程度以浅で被害を受けた新潟地震の被災杭よりさらに深い部分で多数の杭が被害を受けていることが注目される。

以上の事例から想定すべき杭の被害形態として、杭頭付近および地中部における曲げ破壊、せん断破壊、圧壊が挙げられる。地中部とは、具体的には、軟硬の地層境界、液状化層と非液状化層との境界、杭断面の変化点などが想定される。破損度調査の対象として、杭頭付近の破壊は言うまでもないが、それ以上に地中部における破壊が今後の重要課題であると考えられる。

### (3) 杭の被害調査法の現状と非破壊調査の必要性

表-1に杭の被害調査法の一覧を、著者の提案する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す。1995年兵庫県南部地震の際によく利用された手法について詳述する。調査方法としては、上部構造と同様に目視観察が最も確実で、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することが前提となるため、既存の杭を全て撤去するような工事<sup>8)・9)</sup>や研究的な調査<sup>12)</sup>などの例外を除き、一般に調査対象<sup>13)・14)</sup>は杭頭部周辺に限定される。また、地下水位以下の杭、構造物中央部の杭、杭頭部の深い場合等に対しては、土留め、排水、仮受けなどの工事が必要となり、調査が困難となる。さらに、傾斜が大きい場合や供用中の構造物の場合、掘削によって杭の負担軸力の増加が考えら

表-1 現在利用されている杭の被害調査法の一覧

手法名	調査手順	対象杭種	必要 準備工事	破損度評価
				特徴と問題点
掘削露出観察法	杭周囲の地盤を掘削して杭体を露出させ直接目視観察する。内側杭にはアンダーピニングが必要。	全ての杭種	土留工事 排水工事	経験不要で、結果は明白。事例豊富 地下水位以下は困難。 使用者に不安感（重機使用） 準備工事を含めるとコスト高
コアボーリング法	フーチングなどの上から杭体のコアを採取して観察する。	場所打ち杭	場合により掘削工事	採取時のコアの割れと被害による亀裂・破損の区別が困難。
内視カメラ法	コアボーリング孔や既製杭の中空部にカメラを挿入して観察する。	場所打ち杭 既製杭 鋼管杭	コアボーリングや孔内洗浄	比較的明白で、客観的記録が可。 透明度が必要。孔内水懸濁で不可 カメラの性能が様々、事例多い
衝撃弾性波法	杭頭やフーチングを打撃して杭内の反射波を計測・分析して探傷する。	既製杭 場所打ち杭	掘削工事 杭頭露出	検査は簡単だが判断に経験要す。 直接杭頭を打撃できない場合困難 地震起因の判断不能。事例豊富
傾斜計挿入法	既製杭の中空部に挿入式傾斜計を挿入し傾斜を連続計測して変形を計る。	既製杭 鋼管杭	掘削工事 杭頭露出 孔内洗浄	曲げ変形測定に有効。事例あり 大きな変形のない破損の判定は困難 挿入不能な場合不可
破損部 AE 法	破損部から出ている AE 波をセンサー付導波棒により波源位置標定する。埋設型とサスペンション型あり	既製杭 場所打ち杭	地盤ボーリング	被災直後特に有効。深さに制限なし 調査ボーリング孔が利用できる。 経験を要する。定量的評価が課題。 目的別に多種の方法あり

場所打ち杭：場所打ちコンクリート杭，既製杭：既製コンクリート杭（RC杭，PC杭，PHC杭）

れるため、沈下や傾斜の進行に対する不安感が調査者と使用者の両方にあるのが現実である。その意味では、この方法は非破壊調査とは言い難い。

内視カメラ法とは、杭の内側をポアホールカメラや CCD カメラで観察する方法である。過去の地震でも試みられていたが、1995 年兵庫県南部地震では数多く適用された<sup>13)・14)・16)</sup>。内視カメラを挿入する必要があるため、径の大きい場所打ちコンクリート杭等ではフーチング上からコアボーリングすることが、鋼管杭や既製コンクリート杭では、内部の土砂排除、内部の洗浄、透明な清水置換が必要となる。径の小さい杭では、基礎上からのボーリングは困難であり、掘削による杭頭露出が不可欠となる。

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、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。本来、施工された直後の杭の健全性診断試験として開発されたもので、Pile Integrity Test (PIT) と呼ばれている。

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。そのため杭頭部が露出している場合には、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数多く適用された<sup>13)・14)</sup>。

しかし、測定の簡便さに反し、原理的にいくつかの欠点がある。第 1 に、杭頭露出を前提とするため、杭頭部の破損の検出は不可能である。第 2 に、杭がフーチングや基礎と構造的につながっていれば、そ

これらの境界による反射波の影響のため判断が困難な場合も少なくない。林<sup>17)</sup>は、打撃方法に起因する高周波数成分は波形処理により除去することは可能であるが、基礎における反射の影響を除去することは困難である旨を述べている。第3に、明瞭な反射面（破損部）がある場合、杭頭部との間の多重反射のため、その反射面以深の破損部の検出は困難となる。

孔内傾斜計<sup>18)</sup>は、杭の変形を測定するものであり、中空の杭の変形計測にその威力を発揮し、杭の耐震設計法の向上に今後期待される方法である。しかし、破損を直接検出する方法ではない。また、ポアホールカメラと同様に挿入できることが前提となり、上部構造物が存在するときの適用性には問題が残る。

#### (4) 杭の非破壊調査法の必要性

掘削露出観察法は、杭頭部の調査法としては確実な方法であるが、杭の深部の破損が想定される場合には、他の調査法によらざるを得ない。特に、先端支持杭として設計されている杭では全長にわたる健全性が耐震安全性の評価対象となるからである。

しかし、前述した方法には、各々長所があるものの、基礎下の地盤の掘削、上部構造物の撤去や一部の破壊が必要となり、いずれも調査前提条件を併せ考えると、調査全体としては非破壊調査とは言い難い。都市直下で起きた1995年兵庫県南部地震においては、土木・建築の構造物が壊滅的な被害を受け、解体撤去や大がかりな補修が全く珍しくなかった。しかし、この地震は低頻度大規模地震と位置づけることが重要であり、我が国のこれまでの被害地震では、これほどの壊滅的な被害は発生せず、外観上わかりにくい構造物基礎杭の被害などは、本来の意味での非破壊調査法がなければ、調査されにくいものと考えられる必要がある。

したがって、本来の非破壊調査法が開発されれば、杭の被害調査が推進されることが期待できる。

### 3. AEを利用した杭の破損度調査手法

#### (1) 調査手法の概念

本論文で提案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。

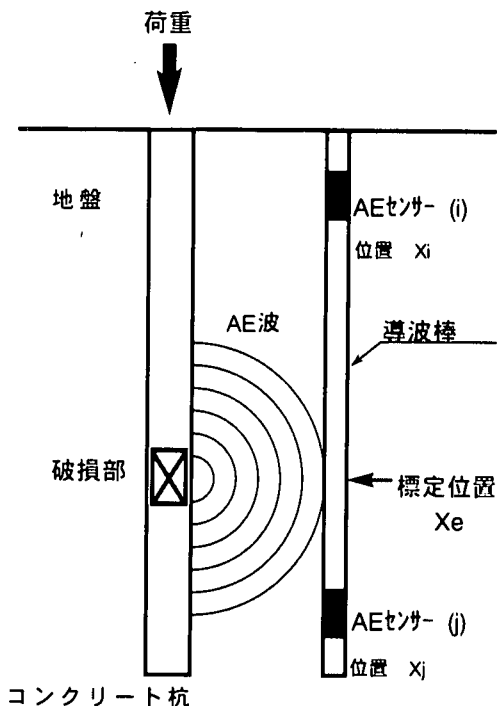


図-1 AE法の概念図

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、検知の時間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。

地震観測のように地震計を直接地盤に設置したり、金属・岩石・コンクリートのAE計測のように射源であり伝播媒体である対象物に直接AEセンサーを設置して、計測することができれば波源探査は容易である。一般に土質材料から成る地盤の減衰は大きいと考えられるので、AEセンサーを地表面に設置する場合、検出が極めて困難である。また、ボーリング孔などを利用してAEセンサーを地盤中に埋設する場合、センサーの密な配置が必要となり、伝播媒体である地盤に直接センサーを設置する計測は困難であると考えられる。また、伝播媒体としての杭体にAEセンサーを設置して計測することもできるが、杭頭露出が前提となる。そこで、減衰の小さい材料を用いてAEセンサーまで減衰を抑制して伝播させるものとして導波棒の利用を考えた。すなわ

ち、杭の破損部から射出された AE 波（弾性波）が地盤を媒体として伝播し、最も近い部分の導波棒に到達したら、できるだけ減衰するのを抑えて AE センサーで AE 波を捉えようというものである。

図-2に現実的な構造物の被災杭に対する多数のセンサーによる本手法の概念図を示す。隣接する2つのセンサーを1対とし、それらで挟まれる部分の杭の破損部を検出しようというものであり、長尺杭を対象に考えている。短い杭であれば最も簡単なセンサー1対のシステムで十分である。

以上のように、本手法は、杭破損部から射出される AE 波を、杭体を伝播媒体として利用せず、導波棒を用いることによって杭から離れた地盤中で計測することによって、破損部を検出するところに最大の特徴がある。

図-3に構造物の被災杭と導波棒の配置を概念的に示す。図-3(a)は最も簡単な1次元標定を意図した導波棒配置である。鉛直に設置した導波棒による調査法の欠点は、破損した杭の特定ができないことである。しかし、一般に杭は比較的均等に配置されているので、地盤に極端な不整形性がなければ、地震被害に支配的な水平動に対して、杭応力の深さ方向の分布形状は、どの杭でも概ね同じ傾向であると考えられる。また、群杭挙動を考えた場合、外周部の杭が内側の杭に比べて水平力の負担が大きいことや、ロッキングによる軸力変動が外周部の杭の方が大きいことから、外周部の杭が最も被害を受けやすいと考えられる。したがって、外周部の杭を対象に調査すれば、杭群の破損度を調査することができると考えられる。

また、図-3(b)に示すように、複数の導波棒を互いに斜めになるように配置することにより、2次元・3次元的に位置標定できる可能性もある。

AE法が破損部から射出される弾性波動を利用する受動的な方法に対して、杭頭部を打撃する衝撃弾性波法は能動的に弾性波動を利用した調査方法と言える。しかしながら、後述するように小さい荷重を付与することにより破損部からの AE 射出を誘導する方法も試みており、これによれば、AE法でも能動的な調査法として捉えることも可能である。

## (2) AE発生 の仮説とAE特性の事前考察

### a) 調査法発案の背景<sup>19)</sup>

1993年7月12日に発生した北海道南西沖地震において、函館市のあるセメントサイロが被災した。周辺地盤一体は広くシルト～シルト質砂の土層が液状化した。地震の翌々日における沈下量は30～90cm、傾斜量は約1/20(約3度)であった<sup>20)</sup>。

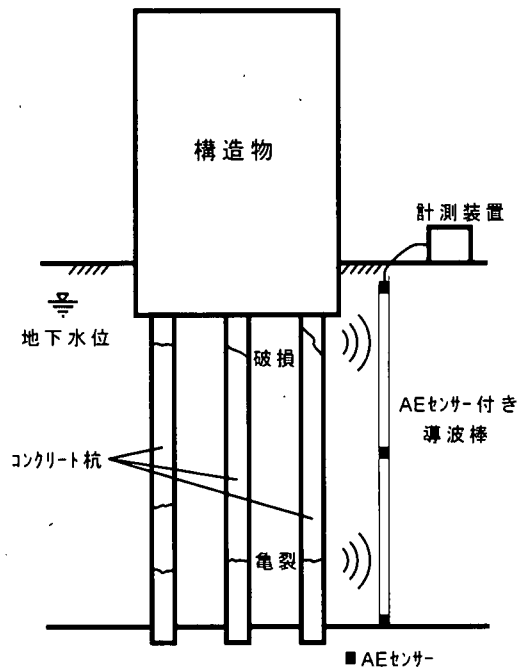


図-2 現実的な構造物の被災杭に対する多数のセンサーを用いた AE 法の概念図

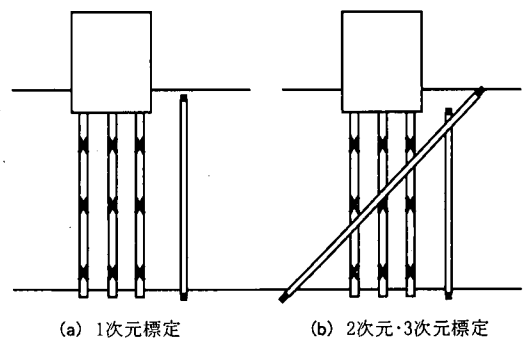


図-3 構造物の被災杭と導波棒の配置の概念図

このサイロは、A種PC杭64本で支持されていたが、沈下と傾斜の大きさから、杭の破損は容易に推測できた。1969年に施工され、1960年版<sup>21)</sup>の規準に準拠して設計されていた。したがって、杭の設計は鉛直支持に対してなされており、水平力は考慮されていない。第一著者はこの被害を詳細に調査したが、その際、被災直後から解体が着手されるまでの約2週間、安全性確認のために、各種計測器でサイロの挙動を計測した。また、解体された後、杭被害について詳細に調査した。このサイロの杭は杭頭部周辺、杭頭部より約2m下、杭中間部で破壊し

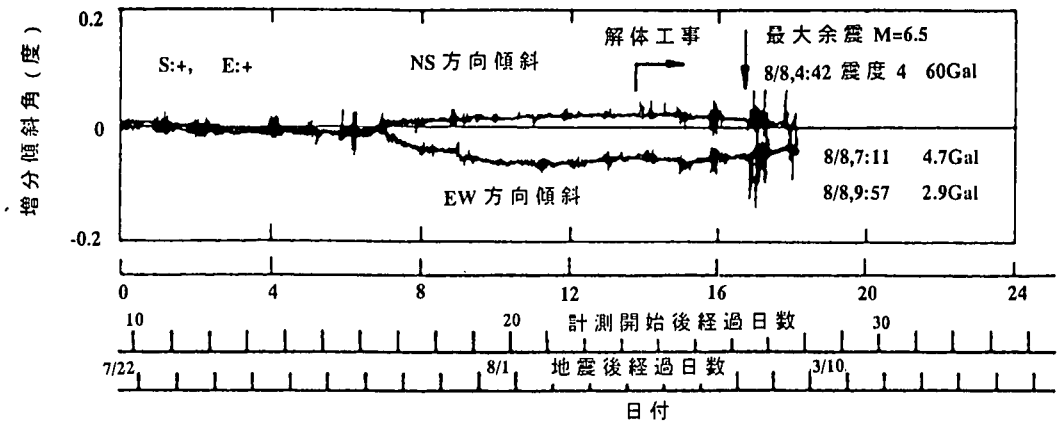


図-4 サイロの増分傾斜角の経時変化

ていた<sup>20)</sup>。

図-4に被災後10日目から1分間隔で計測したこのサイロの増分傾斜角の変化を示す。計測期間において定常時に8:00～17:00の卓越操業時間帯で30～60分の周期で振動していること、被災後でも傾斜が変化する様子が読みとれる。さらに、最大余震(8/8 4:42)の直後から前述の振動が増長し長く続いた。被災後でも傾斜が増減しながら沈下が進んでいたことがわかる。

また、サイロ上部解体後に底版を残しながら、その下の杭頭部周囲を掘削して破損状況を目視調査している際、底版上に重機の荷重が作用したときPC杭の破片が動いたのを目撃する機会があった。

これらの事実より、杭と地盤の塑性化と荷重再配分などによる杭軸力の変動、掘削による杭負担軸力の増加、杭体の残留強度の低下や軸力伝達に有効な断面の縮小化などによる局所的な破壊の進展や微小な外力の増減によるAE発生が期待できると考えた。

#### b) 調査法発案の背景と仮説

以上の経験に基づき次のAE発生の仮説を立てた。

- 仮説1: 地震で被災したコンクリート杭の破損部は、地震後もある期間、破損が進展する。
- 仮説2: 破損の進展は微小な破損の断続的な進行の結果である。
- 仮説3: 微小な破損の進展に伴って、破損部より弾性波(AE)が射出される。
- 仮説4: 場合によっては破損部周辺の地盤中からも弾性波(AE)が射出される。

#### c) 対象とするAEの起因と特性に関する事前考察

これまで主に研究されていたAE<sup>22)・23)</sup>と本手法が対象とするコンクリート杭破損部のAEとの違

いについて若干の考察と第一著者の見解を示す。

大津<sup>24)</sup>によれば、AE研究は、1933年の岸上による地震学の分野に始まり、金属分野、岩石分野で進展し、コンクリート工学の分野に導入された。コンクリート分野<sup>24)・25)</sup>では、戦後急激に蓄積されたコンクリート構造物の維持補修におけるひびわれ診断手法として研究<sup>23)</sup>が進んできた。また、コンクリート分野以外の土木分野では、鋼材、複合材料や岩石、土質材料の破壊特性や劣化特性に関する研究のほか、最近では、橋梁、盛土・切土法面、地下構造物などに関しても研究が行われてきた<sup>26)・27)</sup>。しかし、基礎構造物に対しては研究の前例が見出せない。また、コンクリート分野においてよく扱われているAEは主にクラックが形成・進展するときのAEである。基礎杭に当てはめると、地震時に破壊するとき射出するAEに相当する。

しかし、本提案手法で対象にするのは、そのようなAEではない。この仮説で対象として想定しているのは、地震後の破損部での擦れや破碎の進行などに伴って発生するAEであり、前述のような起因のAEではない。地震でたとえるならば、1度の本震ではなく、本震後に続く数多い余震である。仲佐は、AE発生起因には、局所的な変形や割れに直接関係する1次起因のAEと変形や割れに間接的に関係する擦れ・剥離・破碎・流体漏洩などの2次起因のAEがあるという見解を示している<sup>28)</sup>。現在では広く、1次AEと2次AEとして区別<sup>29)</sup>されている。ここで対象にしようとするAEは仲佐の言う2次起因のAEである。コンクリート分野でも、室内試験とは異なり、例えばRC擁壁の現場計測<sup>30)</sup>において既存ひびわれに対応して検出されたAEは、2次起因のAEであると考えられる。

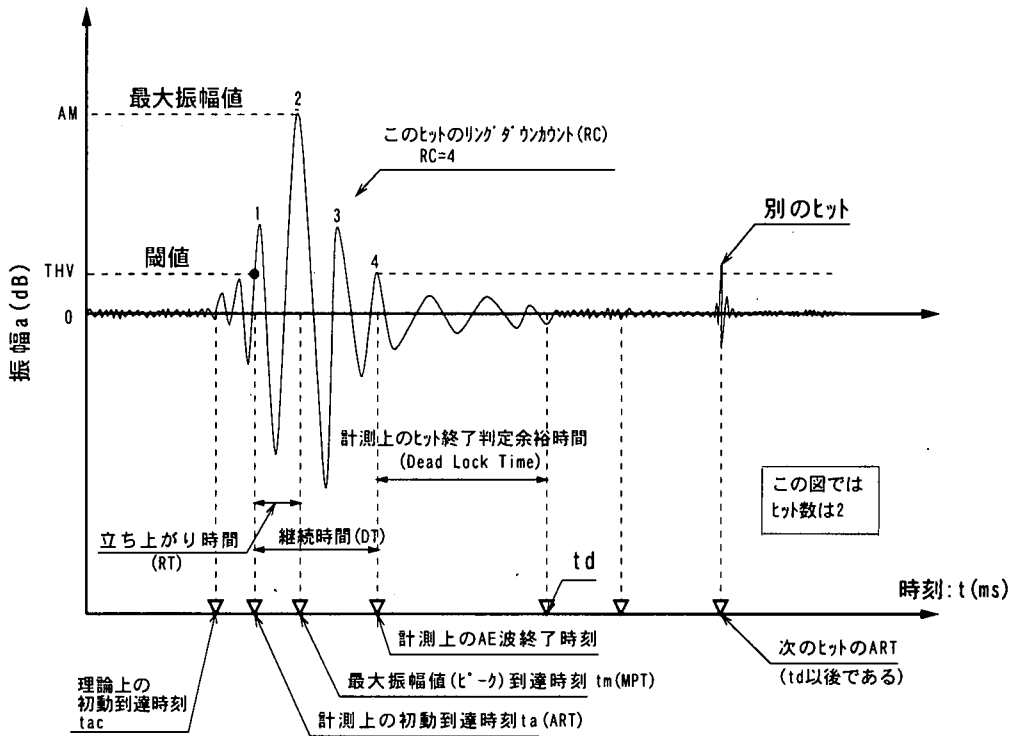


図-5 主な AE パラメータの定義の概念図

一般に、AE の発生挙動には AE 研究の起源と考えられてきた Kaiser により発見されたカイザー効果があり、載荷履歴を受けたものは先行荷重を越えて載荷されなければ AE がほとんど検出されないことがわかっている<sup>2,3)</sup>。しかし、仲佐<sup>2,8)</sup>は 2 次起因の AE は局所的な変形や割れのある部位の応力変動に伴う変形挙動に対応して活発な AE 活性度を示すこと述べるとともに、押さえつけられた 2 枚の鋼板に砂粒が挿入されているときの引張り試験に基づき、損傷部では低荷重時より標定可能な大きい AE 事象が出現することや、AE が負荷時にも除荷時にも発生するだけでなく再負荷時にも低荷重から発生するなど、カイザー効果は見られないと述べている。

したがって、杭がせん断破壊や圧壊などの重度の破壊形態はもちろん、曲げ破壊であっても地震時の繰返し変形により砂粒が入るほどのクラックが生じるほどの破壊であれば、破壊部が安定するまでの期間や低荷重の再負荷下においては、2 次起因の AE が発生する可能性は高いと考えられる。

### (3) 調査法の成立する仮定

前述した仮説が成立したと仮定して、本手法が成立する仮定は次の通りである。

- 仮定 1: 破損部または破損部周辺から射出される AE 波が地盤内減衰を勘案しても検出可能な程度で導波棒まで到達する。
- 仮定 2: 導波棒に到達した AE 波は導波棒を伝わり AE センサーで検出できる。
- 仮定 3: 直近の 2 個の AE センサーで検出した AE 波の到達時間差により導波棒上で一次元的な位置標定ができる。

### (4) 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>3,1)</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。

一方、後者の定量的波形解析は、検出した AE 波形に理論的な逆解析を施して AE 源の定量的情報を得ようとするもので、AE の発生場と伝播体の波動場がモデル化されるような場合には有効な方法であ

るが、本調査法では適用性に問題が多い。

したがって、本調査法では特徴を把握するために波形計測も併用するが、パラメータ計測を主体に考えた。

図-5に主なAEパラメータの定義を概念的に示す。表-2に本研究で主に着目する項目とAEパラメータを示す。ヒットとはAEセンサーで検出されたAE信号であり、AEパラメータを持つ。イベントとは、複数のAEセンサーで検出されたヒットから位置標定されたヒット群を指す。杭の破損度の指標としては、AEの活性度を反映するイベント数（EV）やAE波の大きさを表す最大振幅値（AM）、リングダウンカウント（RC）、エネルギー（EN）に着目する。活性度の時間的遷移の指標として、単位時間当たりのEV（event rate: EVR）、単位時間当たりのRC（RC rate: RCR）に着目する。その他、総合的な破損の程度を表すと考えられるEV、RC、ENの累積量に着目する。

図-5からわかるように、表-2に示したパラメータは閾値（threshold value: THV）の設定に左右される。特に、パラメータ計測における初動到達時刻（ART）は、見かけのものであり真のARTではない。したがって、室内実験でも現場測定でもTHVの設定が重要となる。

#### b) AE源の位置標定原理

前記の仮定1～3が成立した場合、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 $t_{i, j}$ 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、 $v$ 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。

#### (5) 調査法成立のために解決すべき課題

前節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課題であり、迅速化と低コスト化が開発の課題である。前者の課題を整理する。

課題1: 破損部から射出されるAEの発生の確認

(仮説3に対応)

課題2: 破損部周辺から射出されるAE波の地盤内導波棒での検出(仮説3,4と仮定1に対応)

課題3: 地震後の杭破損の進展の確認

(仮説1に対応)

表-2 本研究で主に着目する項目とAEパラメータ

項目とAEパラメータ	略称	単位
【着目項目】		
閾値	THV	dB
初動到達時刻	ART	ms
最大振幅時刻	MPT	ms
【AEパラメータ】		
ヒット数	HT	なし(個)
イベント数	EV	なし(個)
立ち上がり時間	RT	ms
継続時間	DT	ms
リングダウンカウント	RC	なし(個)
最大振幅値	AM	dB
エネルギー	EN	dB·ms

課題4: 地震後のAE活性度の維持の確認  
(仮説2,3に対応)

課題5: 破損部の位置標定法の妥当性確認  
(仮定2,3に対応)

以上の課題に対し、仮説に対応する課題1,3,4は実物の破損杭を対象にした現場実験により、仮定に対応する課題2,5は室内実験と現場実験により、解決するのが妥当であると考えた。

したがって、以降で示す室内実験と現場実験の結果とその議論の目的は、上記の課題に対応する。

## 4. 室内実験

### (1) 実験の目的

3.(5)で示した課題2,5を解決することを目的として、簡易な模型破損杭を用いた室内実験を実施し、その可能性を検討した。すなわち、3.(3)で示した本調査法成立の仮定の実験室レベルでの確認である。3.(4)で示した1次元位置標定法の妥当性を示した後、2次元位置標定の可能性についても示す。

### (2) 1次元位置標定法に関する実験<sup>3.2), 3.3), 3.4)</sup>

#### a) 実験方法

図-6に実験装置を示す。長さ×幅×奥行=50×66×48cmの箱の中に模型杭と導波棒を設置した後、含水比15%程度の湿潤状態の豊浦砂を仕上り1層が5cmになるよう、重さ2.5kgfのランマーを高さ20cmから3回ずつ落下させ、全砂層厚40cmの模型地盤を作成した。模型破損杭は、健全な上杭と下杭の間に破損部を挟むようにして作成した。健全な杭は、直径 $\phi$ =30mmのセメントモルタル製である。





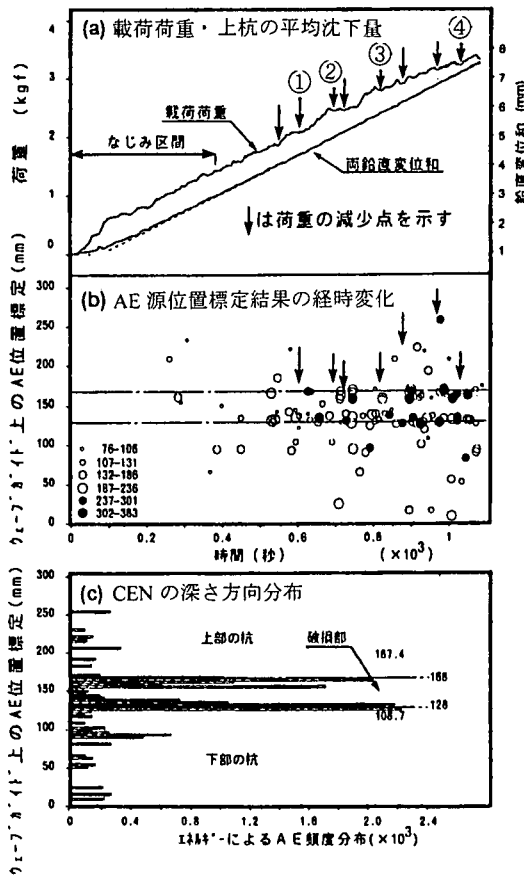


図-7 パミス破損部杭模型における AE 源の位置標定結果の経時変化と累積エネルギー（CEN）の深さ方向分布

られず平坦になっている部分と見る事ができる。一方、図-7(a)と(b)を対応させてよく見ると、特に①～④で示す時点より前、すなわち荷重の傾きが僅かに大きくなっている時間帯で AE の活動が高まっていることがわかる。しかもその活動の多くは破損部分に相当する深さに標定された AE 源である。

すなわち、接線剛性の増加と破損部 AE 発生の対応は、パミス間の接点での破砕と噛み合いの強化に起因すると推察される。また、荷重の低下は表面破砕の結果、パミス粒子が再配置されたものと推察できる。実験終了後に掘り出した杭の破損部は、軸方向に縮み横方向に膨らんでいたことから、この推察は妥当であると考えられる。

図-7(b)や累積した深さ分布として表した(c)では、破損部に相当する深さで集中して AE 源が位置標定されており、パミス破損部杭模型を用いた室内実験では、破損部の破壊の進展により AE 波が発生すること(仮説3)、それが導波棒で検出できること(仮定1)、位置標定法が妥当であること(仮定

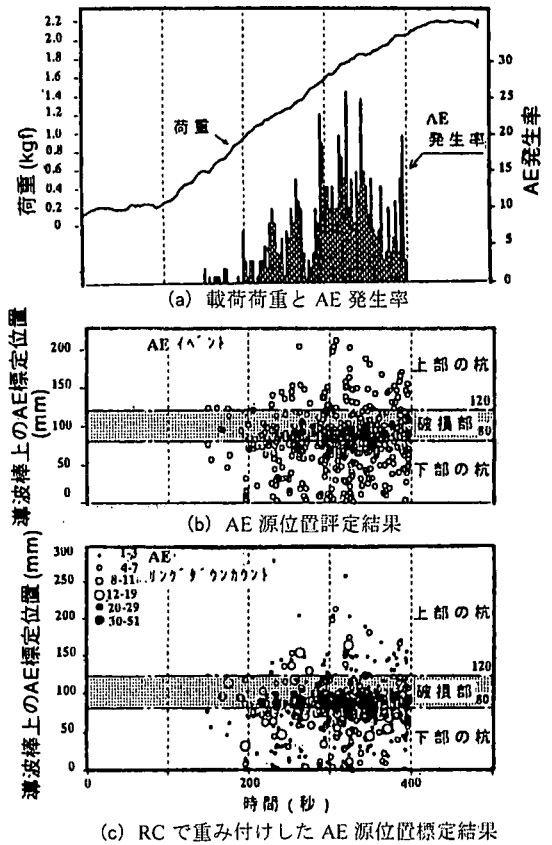


図-8 模擬破損部杭模型における実験結果の経時変化

2.3) が確認された。

#### d) 模擬破損部杭模型の実験結果<sup>32), 34)</sup>

図-8に模擬破損部杭模型における実験結果を示す。図-8(a)は載荷荷重と3分あたりの AE 発生率 (EVR)、図-8(b)は AE 源の位置標定結果、図-8(c)はリングダウンカウンタ (RC) の大きさで重み付けした AE 源の位置標定結果、それぞれの経時変化である。なお、荷重以外は、0-400s の間のデータのみ図示している。

パミス破損部杭模型と同様に、図-8(a)での 100s 以降の荷重-時間関係は、荷重-沈下関係と相似であると見なしうる。この場合 0.2kgf 以下を有効な荷重でないと見なししている。また、沈下の進行にかかわらず 2.2kgf で上限が確認されたので、この破損杭の極限荷重は約 2kgf と考えた。なお、パミス極限荷重は確認されなかった。

この杭模型の極限荷重の約 2 割に相当する有効荷重 (0.4kgf) に達する 150s 以降で AE の発生が見られ、200s 以降では荷重の増加とともに AE の発

生が活性化される。

150-200sの間を弾性的な挙動と見なし、2点間を結んだ直線を弾性体としての破損部の荷重-圧縮関係の相似形と見なすと、荷重の経時変化は150-220s間、220-340s間、340-445s間の3区間において、おおむね3つの折れ線で表し得るような変化をしているのがわかる。EVRの変化を見ると、それぞれの区間は明瞭な傾向が見いだせる。第1区間では、AEの発生があるものの活性度が低い。第2区間では、荷重の増加とともに活性度が高くなる。第3区間では、荷重は増加しても時間とともに活性度が低下する。すなわち、AE発生が破損部の状態に強く依存するものと仮定すると、活性度が最高に達する340sで破損部は完全に破壊したものと考えられる。すなわち、340sのときに示した有効荷重1.8kgfが杭破損部の降伏荷重であると考えられる。

荷重と図-8(c)のRCで重み付けしたAE発生状況の対応をよく見ると、荷重は上昇部と平坦または下降部の繰返しを伴い全体として増加する。パミス破損部杭ほど明瞭ではないが、同様に、平坦または下降部に対応してAE発生率(EVR)の増大が認められる。これらの部分は微小破壊の進展を意味する。さらに、EVRの大きい時間では、RCの大きいAEが破損部付近集中して発生している。

図-8(b)では破損部を中心に破損部の上下でも多くのAE源が位置標定されているが、図-8(c)のようにRCの大きさに重み付けすると、RCの大きいAE源は破損部に集中していることがわかる。

#### e) 用いるAEパラメータの検討<sup>33)</sup>

図-9は、図-8の結果を用いて、深さ方向に3mm間隔で整理した深さ方向分布である。図-9(a)は累積EVの、図-9(b)は累積RCの深さ分布である。図中には、調査精度の指標と考えられる平均値(重心位置)と標準偏差を併せて記してある。

両分布の重心位置はほぼ一致しており、これらは破損部下端付近に対応している。さらに、RCによる結果はEVによる結果に比較して、標準偏差が減少すること、全分布面積に対する破損部内面積の割合が大きいことなどが指摘できる。このことから、AEパラメータとして単なるEVよりRCで重み付けした方が破損位置評価に効果的であると考えられる。

AE位置標定精度を比較検討した結果、エネルギー(EN)やリングダウンカウント(RC)などのAEパラメータによる重み付けは本調査法に有効な手法であることがわかった。ただし、ENの計算法は標準化されていないためRCの方が一般的であると考えられる。

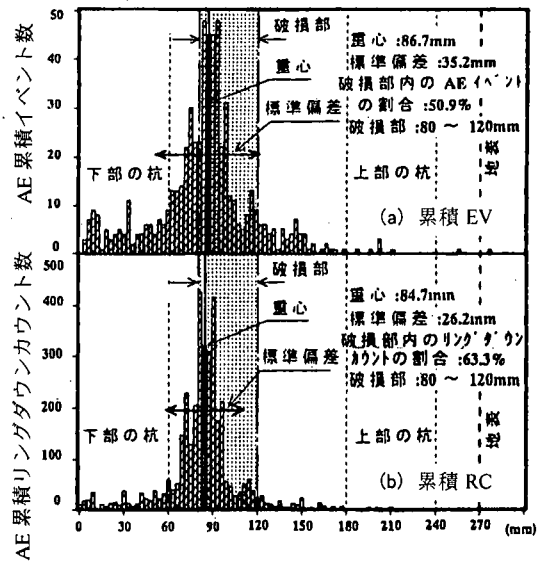


図-9 深さ方向に3mm間隔で整理した累積EVとRCの深さ方向分布

#### f) 1次元標定法に関する実験のまとめ

パミス破損部と模擬破損部の両方の杭模型において、破損部の破壊の進行と関連していると考えられるAEの発生が確認された。また、ENやRCなどで重み付けした場合の相対的に大きいAE発生源が破損部に相当する深さに位置標定できた。以上の結果より、破損部の破壊の進展によりAE波が発生すること(仮説3)、それが導波棒で検出できること(仮定1)、位置標定法が妥当であること(仮定2,3)が確認された。したがって、課題2,5は実験室レベルでは解決された結論づけられる。

#### (3) 2次元標定法に関する実験<sup>35)</sup>

##### a) 目的と実験方法

3. (1) で述べたように、1本の導波棒では杭が複数存在する場合、どの杭から発生したAE波か特定できない。特定に対する要求が高い場合に対応するため、ここでは、図-3(b)に示したような2次元、3次元の位置標定法の可能性を確認することを目的に、2本の破損杭に対し2本の導波棒を用いて、2次元位置標定を試みた。

図-10に実験装置を示す。長さ×高さ×奥行き=60×40×60cmの実験箱の中に、乾燥豊浦標準砂を用いて、空中落下法により全砂厚層35.5cmの地盤を作成した。破損模型杭は、健全な上杭と下杭はアルミニウム丸棒(φ=30mm)であり、AE波発生に再現性の高いパミスシリコンゴムで固めて作成した破損部モデルを挟んで作成した。

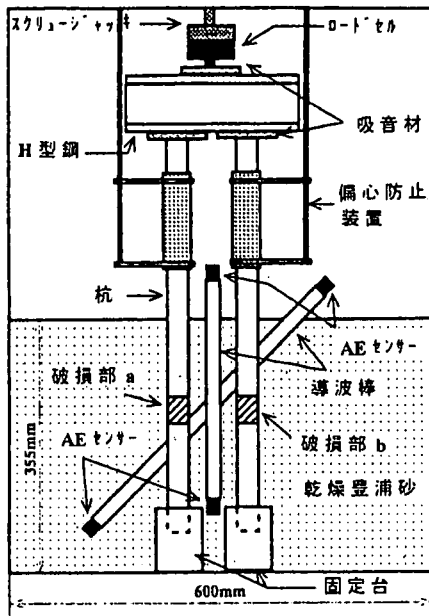


図-10 2次元標定法に関する実験装置

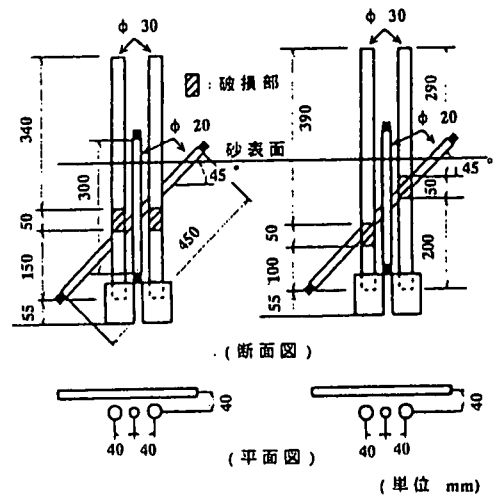


図-11 模型杭と導波棒の位置関係

実験は、破損部高さが同じ場合と異なる場合の2種類行った。図-11に模型杭と導波棒の2種類の位置関係を示す。AEは、両端にAEセンサー（共振周波数 60KHz）を取り付けた導波棒（アルミニウム製  $\phi = 20\text{mm}$ ）2本を鉛直および斜め45°に各1本を設置し計測した。計測はパラメータ計測である。

荷重は、前述した実験と同様に、スクリージャックによる変位制御で行った。AE源の位置は2本の導波棒で同時に1次元標定した。

#### b) 荷重変動とAE発生との相互関係

図-12に荷重と位置標定の経時変化を示す。横軸は荷重時間、縦軸は荷重荷重および鉛直に設置した導波棒下端を原点としたAEイベントの標定位置を表している。この図より、荷重の伸びが鈍り始める時点までの区間①では比較的AEの活動度は小さい。その後、荷重増加が緩やかとなる区間②において、破損部に相当する深さでAEの発生が増加し活動度が高まる。これは、破損部のパミスの粒子破碎が進行していると考えられる。荷重が微増するもののほぼ頭打ち状態である区間③では、AEの活動度が一層高まる。

#### c) AE深さ方向分布による破損位置の評価

図-13に破損部の高さが異なる場合の実験におけるAEの累積RCで重み付けしたEVの深さ方向分布を示す。横軸は導波棒の各区間（5mm）に発生した累積RC、縦軸は導波棒下端を原点とした導波棒上の距離である。この図の鉛直に配した導波棒に

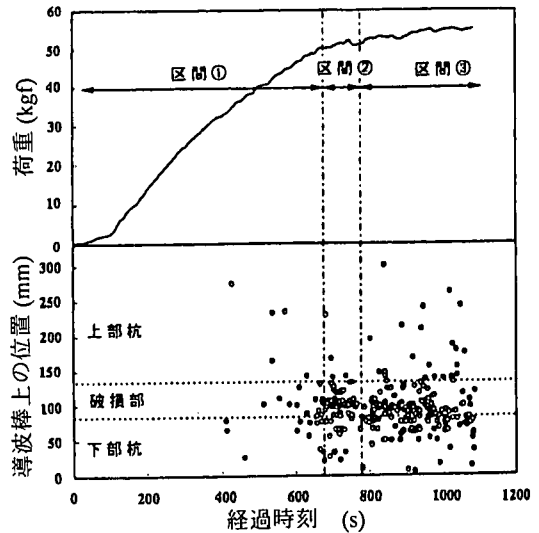


図-12 荷重と位置標定の経時変化

おける位置標定結果では、AEは破損部の下にも小さいピークが見られるものの、大半は破損部内に集中している。また、斜めに配した導波棒の位置標定結果では、累積RCのピークは明瞭に2つ現れ、2本の杭の破損部位置から最短距離に相当する導波棒上の位置に相当し、2本の杭の2つの破損部位置を検出できている。破損部高さが異なる場合、斜めに配した導波棒上において、破損部aとbからの最短点の間隔が広いので、破損部を明瞭に分離できたものと思われる。

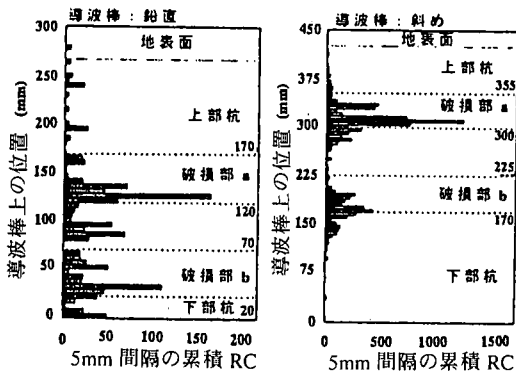


図-13 破損部の高さが異なる場合の実験における AE の累積 RC で重み付けした EV の深さ方向分布

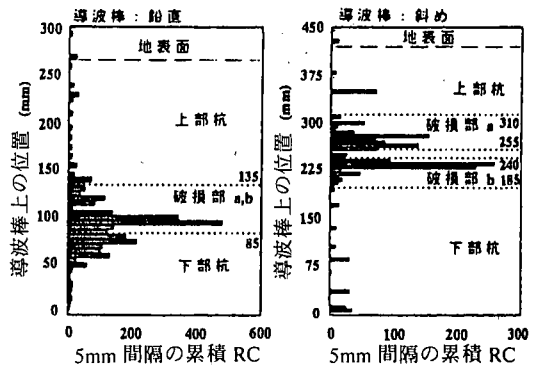


図-14 破損部が同じ高さの場合の実験における AE の累積 RC で重み付けした EV の深さ方向分布

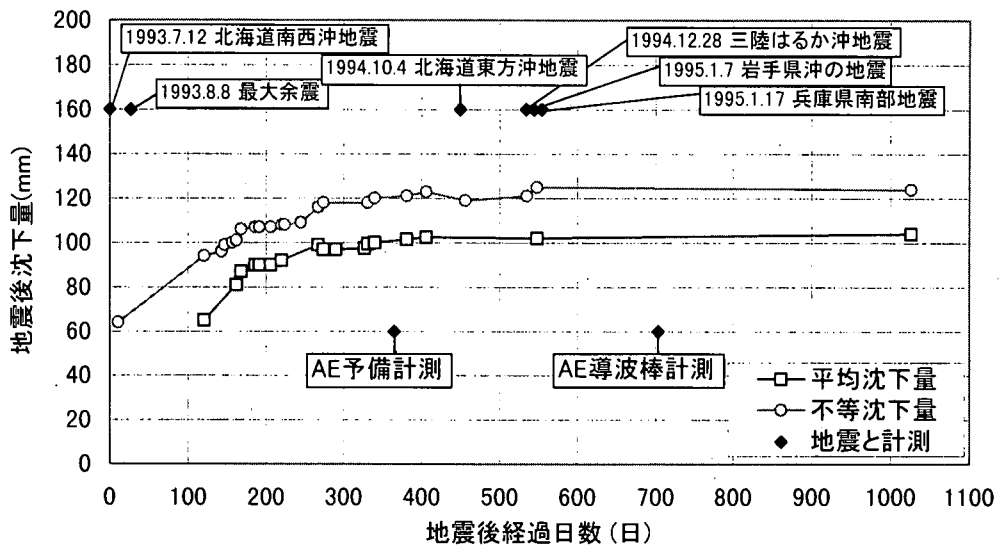


図-15 5000ton 貯蔵構造物の変位挙動の経時変化

図-14に破損部が同じ高さの実験における AE の累積 RC で重み付けした EV の深さ方向分布を示す。ここで、この図は破損部が同じ高さであるため、鉛直に配した導波棒に対する位置標定結果のみでは、検出された AE がいずれの杭の破損部より射出したのか判断できない。しかしながら、斜めに配した導波棒による位置標定結果では、累積 RC 分布のピークは 2 箇所あり、いずれも破損部から最短距離に相当する導波棒上の位置と合致している。

すなわち、斜めの導波棒を用いた 2 次元標定法によって、1 次元標定法で認識できない 2 本の杭の破損部を分離して検出できることが確認できた。

## 5. 実構造物における本手法の適用と検証<sup>9)</sup>

### (1) 実地盤における AE 発生仮説に関する予備計測

前述の被災したサイロと同様の地盤構造の杭基礎

構造物に対して本手法を適用する現場計測を実施した。

この構造物の建つ地盤では、1993 年北海道南西沖地震の際におびただしい液状化による噴砂が観察されており、また、地震当時の揺れはその後の調査により震度 5 程度と見積もられている。この構造物は、直径 400mm の A 種 PHC 杭で支持されており、外観上・機能上の被害は認められていないが、安全性を確認する目的で変位挙動が計測されている。

図-15にこの構造物の沈下挙動の経時変化を示す。時間の経過とともに沈下挙動は概ね収束しつつある。しかし、地震後 400 日の間、沈下はほぼ単調増加であったこと、および、1993 年 7 月 12 日の地震後 3 年以上を経た時点でもわずかに沈下と傾斜が進行していることが読み取れ、杭の被害が懸念される。

この事実により、被災した直後に増加した地盤の応力に起因した地盤の変形が土の粘性により時間遅

れが生じ、それに伴い杭体の破壊の進展も時間的な遅れが生じたと考えられる。また、貯蔵施設であるため貯蔵物の出し入れによる変動荷重もこれらの挙動に大きく寄与していると考えられる。すなわち、杭体の破壊の進展が調査に十分なだけの時間継続的であれば、最大履歴荷重を上回る外力を付加しなくとも、自重や変動荷重に起因する AE 発生が期待できる。

予備計測は、前述した仮説を現実の被災構造物で確認することを目的として、地震から1年が経過した1994年7月10～13日に、貯蔵物補充時期に合わせて予備実験を実施した。長さ5mのφ50mmの鋼棒4本を、基礎から1.7m,2.0m,3.0m,3.5m離れた地盤内に鉛直に打設し、上部にAEセンサーを設置した。計測は、40dBのプリアンプ内蔵型の60KHz共振の圧電型(PZT)AEセンサー(型式名)を真空グリースを塗付した鋼棒頭端部に密着させて取付け、Spartan2000(PAC社製)によりパラメータ計測を行った。図-16に代表例として2m位置のセンサーによる10分あたりのAE発生率(EVR)の経時変化を示す。補充以前の24時間のAE発生率をバックグラウンドノイズ(以下BGNと略す。)と仮定して図に示した。貯蔵物補充完了(設計上の長期荷重に相当する。)後AE発生率が大きくなるのが断続的に現れているのがわかる。また、計測中、偶然7月12日7時33分に震度1(地盤の良好な気象台)の余震があり、この地震以降、ERは急増しBGNを大きく上回っている。以上のことから、静的な荷重増分や構造物のロッキングによる外周部の杭の軸力変動が、静的な荷重増分にも増して有意なAE発生を誘発したものと推察される。

これらのことから、直接的ではないが前述の仮説が成立する傍証を得たものと考えられる。なお、室内実験は、この観測事実に基づいて実施された。

## (2) 提案するAE法による破損部位置標定の検証

前述の予備計測と室内実験の結果を踏まえて、同じ構造物を対象に、導波棒によるAE源の一次元標定の現場実験を実施した。AEセンサーと計測装置は、前述の予備計測と同様である。構造物の基礎端から1.5m離れた地点にAEセンサーを4個固定した長さ24mの中空アルミパイプ(外径120mm,内径60mm)の導波棒1を、3.0m離れた地点にAEセンサーを上下端に2個固定した長さ10mの中実アルミ棒の導波棒2を地盤内に密着するように鉛直に埋設した(1995年5月27日)。なお、埋設はあらかじめボーリングを行い、導波棒を装填した後、ベントナイトを充填した。充填した後2日間の計測では

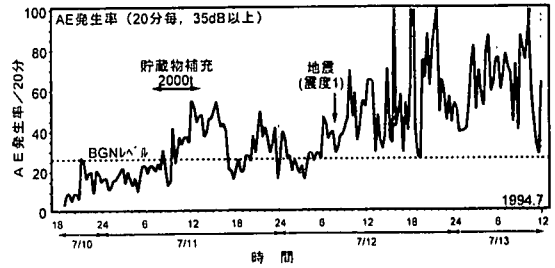


図-16 20分あたりAE発生率の経時変化(2m位置)

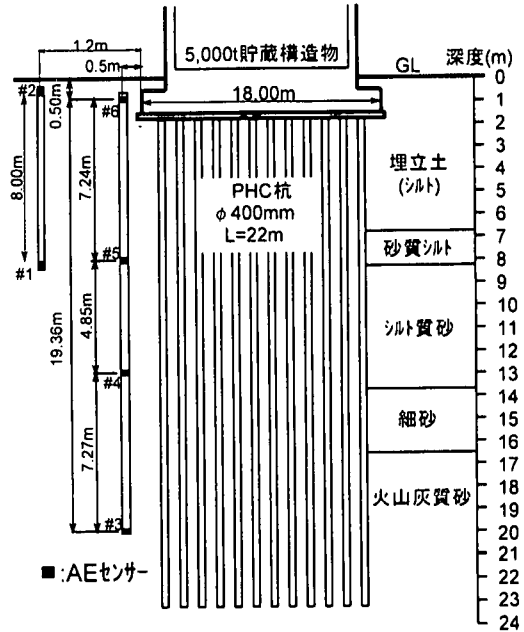


図-17 地盤構成と構造物と導波棒およびAEセンサーの配置図

ベントナイトの沈殿固化の様子だけがAEとして捉えられた。完全にベントナイトの固化が完了し、導波棒と地盤との密着を図った後、貯蔵物補充時(約3000t)に合わせて埋設から19日後の1995年6月12～17日に計測を実施した。計測において閾値(THV)を35dBとしている。図-17に地盤構成と構造物と導波棒およびAEセンサーの配置を示す。なお、地下水位は概ね構造物の基礎底版下端付近にある。6月15日11:30～20:00に貯蔵物が補充された。

ここではAEセンサーを4個配置した長さ20mの導波棒1の結果について述べる。図-18に補充前のAEイベントの標定深さ位置の経時変化をRCの大きさで重み付けして示す。貯蔵物補充の前では、3m付近と8m付近で相対的に大きいAEが他の深さより多く発生している。また、図には示していないが、貯蔵物補充の直後には相対的に3m付近を中心とする浅い位置に、AEの発生量が増えRCも大

きくなっていた。しかし、時間の経過と共に 8m 付近や 12m 付近の AE の発生が増えていた。3m, 6m, 8-10m, 12m 付近に AE 発生が相対的に集中していることがわかった。特に、8-10m の AE 発生が補充後に顕著であった。図-19 に補充前の 15.5 時間、補充中と補充後 3 時間の 11.5 時間、さらにその後 23.5 時間における 0.25m 深さごとの累積リングダウンカウントの深さ方向分布を示す。0-2m は基礎版に相当し、ここでは考察の対象としない。

杭頭部に相当する 3m 付近、液状化した埋立層下端に相当する 6m 付近と杭の継ぎ部に相当する 12m 付近では、累積 RC は大きくないが、大きい RC の有意な AE イベントが断続的に検出されているのに対して、埋立層の約 1.5 倍のせん断波速度を有するシルト質砂層の上部に相当する 8-10m 付近では、AE イベントの RC は大きくないが、連続的に検出され、結果として累積 RC が大きいという特徴がある。これらの特徴は破損の形態や程度と関連することが推察されるが、今後の課題である。

3m 付近は杭頭部に相当することと杭頭が剛結になるような接合方法が用いられていることから、杭頭部に作用する慣性力と地盤変形の両者が原因となり破損している可能性が考えられる。

6m 付近は、埋立層下端に相当する。また、8-10m 付近は埋立層以上に軟弱な旧海底面表層に相当する砂質シルト層を挟み埋立層の約 1.5 倍のせん断波速度を有するシルト質砂層の上部に相当する。すなわち、これらの深さは、液状化層と非液状化層の境界に相当するものと考えられる。すなわち、液状化した際の地盤の変形挙動の大きな変化点に相当し、地盤変形が原因で破損している可能性が考えられる。

12m 付近は 2 本の杭の継ぎ部の深さに相当する。

また、3m, 6m, 8-10m という深さは前述した近傍の被災した構造物の杭の破損が確認された深さにほぼ一致する。

以上の考察から、直接当該構造物の杭を確認したわけではないので断定できないが、本調査法で推測される破損位置で杭が何らかの破損が生じている可能性が高いものと判断している。

## 6. 結論

導波棒と AE センサーを用いた AE 法によるコンクリート破損調査法について、前提となる仮説と仮定を述べ、これらの妥当性を確認するために、段階的に高度化した室内実験と軟弱地盤上の大きな地震動を経験した構造物の基礎杭を対象にした現場実験を実施した。その結果、次の結論が得られた。

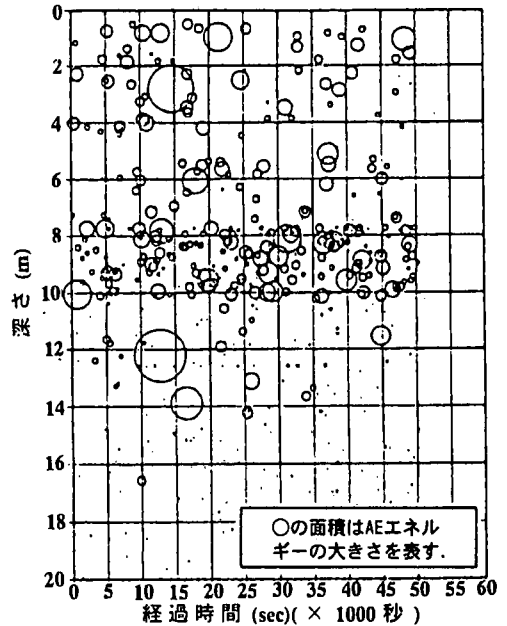


図-18 AE イベントの標定深さ位置の経時変化

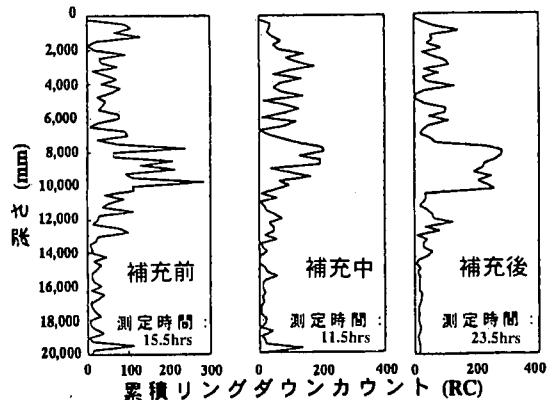


図-19 累積リングダウンカウントの深さ方向分布

- (1) AE を利用した杭の破損度調査法の原理を述べ、本調査法発案の背景と調査法の成立するための仮説と仮定を明らかにした上で、解決すべき課題を明確にした。
- (2) 室内模型実験により、調査法として成立するための本文中で述べた仮定（破損部または破損部周辺から射出される AE 波が地盤内減衰を勘案しても検出可能な程度で導波棒まで到達し〔仮定 1〕、導波棒に到達した AE 波は導波棒を伝わり AE センサーで検出でき〔仮定 2〕、直近の 2 個の AE センサーで検出した AE 波の到達時間差により導波棒上で一次的な位置標定ができ

る〔仮定3〕。〕が成立することを示すとともに、破損位置を1次元的にも2次元的にも標定できることを示し、本手法が調査法として成立する可能性が検証された。

- (3)1993年北海道南西沖地震により破損した可能性の高い杭基礎構造物を対象にした変位挙動計測と提案するAE計測からなる現場実験により、調査法の前提となる仮説（地震で被災したコンクリート杭の破損部は、地震後もある期間、破損が進展し〔仮説1〕、破損の進展は微小な破損の断続的な進行の結果であり〔仮説2〕、微小な破損の進展に伴って、破損部より弾性波(AE)が射出される〔仮説3〕。〕がほぼ成立することを示すとともに、調査法が実際に被災していると考えられる杭の被害に対して、妥当な結果を与えることを示し、本調査法が実際の構造物にも適用できる可能性が検証された。

本論文では、調査手法が成立しうることを実証した。しかし、破損の程度を判断できるような定量的評価は今後の課題として残されている。

謝辞： 本調査法の開発に当たり、多くの方の協力を得た。室内実験は飛島建設技術研究所と徳島大学工学部土質基礎研究室と共同で実施したものであり、室内実験の実施に当たっては、徳島大学の前教授・澤田健吉先生、講師・藤井清司先生、宇良成泰氏（現・前田道路、元徳島大学学生）、山本清広氏（現・徳島大学大学院学生）に多大な協力を戴いた。また、京都大学工学部教授の小林昭一先生、京都大学防災研教授の亀田弘行先生、熊本大学教授の大津政康先生には、本論文の草稿を読んで戴いた。また、土木学会耐震工学委員会地震荷重研究小委員会（委員長：伯野元彦 東洋大学教授）の委員の皆様や東北大学工学部教授 杉村義広先生からご意見を戴いた。飛島建設技術研究所の岩城圭介 研究員にはプロジェクトメンバーとして現場測定で多大な協力を戴いた。同所の平松勝二 前所長、長谷川昌弘 所長、境野典夫 室長、には開発プロジェクトの着手と運営に協力を戴いた。最後に記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 建設省：土木構造物の震災復旧技術マニュアル、(財)土木研究センター、539pp., 1987.3.
- 2) 建設省：建築構造物の震災復旧技術マニュアル、(社)建築研究振興協会、839pp., 1987.5.
- 3) 建設省土木研究所：新潟地震調査報告書、土木研究所報告125号、1965.6.

- 4) たとえば、建設省建築研究所：1978年宮城県沖地震による既製コンクリート杭の被害調査報告、建築研究資料、No.31、1981.7.
- 5) 水野 二十一：基礎構造の被害—特に杭基礎について、構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム、日本建築学会、1985.4.
- 6) 土木学会新潟震災調査委員会編：昭和39年新潟地震被害調査報告、1966.6.
- 7) 吉田 巖：新潟地震における鉄筋コンクリートぐいの被害の一例、第8回地震工学研究発表会講演概要集、1965.
- 8) 河村 壮一、西沢 敏明、田尻 貞夫：液状化で破損した杭の調査、基礎工、Vol.12、No.7、1984.7.
- 9) 栗原 修三、大藤 辰雄、仲山 博：ホテル新潟建設工事—新潟特有の砂地盤における山留め工事例—、基礎工、Vol.16、3、1988.3.
- 10) 浜田 政則、安田 進、磯山 龍二、恵本 克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、第376号/III-6、pp.211-220、1986.12.
- 11) 森 伸一郎、清水 勝美、鈴木 信久、高木 政美、中村 晋：液状化による地盤の永久変位に起因する杭基礎の被害と解析、土木学会第20回地震工学研究発表会講演概要、pp.25-28、1989.7.
- 12) 吉田 望、小林 恒一、中村 晋：1964年新潟地震で被害を受けたS建物の基礎杭の調査、土と基礎、Vol.36、No.6、pp.39-44、1990.6.
- 13) 兵庫県南部地震道路橋被災対策委員会：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、146pp., 1995.12.
- 14) 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、400pp., 1996.7.
- 15) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、594pp., 1996.3.
- 16) 大岡 弘、飯場 正紀、阿部 秋男、時松 孝次：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の被害調査、土と基礎、Vol.44、No.3、pp.28-30、1996.3.
- 17) 林 隆浩：コンクリート基礎杭の品質管理手法に関する基礎的研究、愛知工業大学博士論文、1996.1.
- 18) 社本 康広、佐藤 正義、二木 幹夫、嶋津 伸一：埋立て地盤の液状化による杭の変形調査、土と基礎、Vol.44、No.3、pp.25-27、1996.3.
- 19) 森 伸一郎、塩谷 智基：AEを利用したコンクリート杭破損調査法の軟弱地盤上の構造物基礎への適用、第31回地盤工学研究発表会講演集、1996.7.
- 20) 森 伸一郎、沼田 淳紀、三輪 滋、柴田 登：1993年北海道南西沖地震における液状化調査、土質工学会北海道支部技術報告集第34号、pp.64-73、1994.2.
- 21) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説、1960.
- 22) 尾上 守夫、山口 楠雄、仲佐 博裕、佐野 謙一、磯野 英二、渡辺 哲夫：アコースティック・エミッションの基礎と応用、コロナ社、1976.
- 23) 大津 政康：アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版、1988.
- 24) 大津 政康：コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション(AE)研究の歴史と現状、土木学会論文集No.496/V-24、pp.9-19、1994.8.
- 25) 大津 政康：コンクリート工学における非破壊試験法の現状、コンクリート工学、Vol.31、No.12、pp.5-14、1993.12.
- 26) 大津 政康：土木のAE、超音波テクノ、日本工業出版、Vol.4、No.12、pp.28-34、1992.12.
- 27) 日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッシ



- ン (AE) の土木分野への応用, 日本非破壊検査協会, pp.1-58, 1995.
- 28) 仲佐 博裕: アコースティック・エミッションの理論と実際, 地人書館, 1994.
- 29) 日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッションⅠ, 日本非破壊検査協会講習会資料, pp.1-36, 1995.
- 30) 松山 公年, 藤原 鉄朗, 石橋 晃睦, 福地 伸一, 大津 政康: 野外鉄筋コンクリート擁壁における AE 法の適用, 第 9 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp.131-136, 1993.
- 31) 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.
- 32) 森 伸一郎, 宇良 成泰, 塩谷 智基, 藤井 清司: AE を利用したコンクリート杭の破損調査法, 土質工学会 第 30 回研究発表会, pp.1581-1582, 1995.7.
- 33) 森 伸一郎, 宇良 成泰, 塩谷 智基, 藤井 清司: コンクリート杭の AE 破損調査法における AE パラメータの検討, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部, pp.950-951, 1995.9.
- 34) 森 伸一郎, 塩谷 智基, 宇良 成泰, 藤井 清司: 地震で被災したコンクリート杭の AE 破損調査法, 土木学会第 23 回地震工学研究発表会, pp.655-658, 1995.7.
- 35) 山本 清司, 森 伸一郎, 塩谷 智基, 藤井 清司: AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の二次元標定法の適用, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部, pp.153-154, 1996.9.

(1997.10.6 受付)

## DEVELOPMENT OF A NEW INSPECTION METHOD FOR CONCRETE PILES DAMAGED DUE TO EARTHQUAKES BY ACOUSTIC EMISSION WAVES FROM DAMAGED PORTIONS

Shin'ichiro MORI and Tomoki SHIOTANI

When a structure is subjected to a strong earthquake motion, damage of an upper-structure is immediately investigated by structural engineers. On the other hands, damage of pile foundation is likely not investigated because of economical and technical reasons. A new damage-inspection method for concrete piles damaged by an earthquake has been developed using AE waves emitted from damaged portions of piles. In this paper, a principle of the proposed method, background and hypotheses of this method are discussed. Then, a principal applicability of the proposed method is demonstrated by some laboratory tests. A field applicability is shown by field tests conducted onto real piles broken by a big earthquake.