

# AE法による杭診断技術に関する基礎的研究と実構造物適用事例

飛鳥建設(株)技術研究所 正会員 塩谷智基  
飛鳥建設(株)技術研究所 正会員 境野典夫

## 1. はじめに

構造物に地震などの予期せぬ外力が作用し被災した場合、その健全性評価が必要となる。外観から調査可能な上部構造に対し、下部、特に地中深くまで埋設された杭基礎の被害調査は困難である。これまで、杭の健全性調査法として、杭上部からの衝撃弾性波による試験(IT試験)、杭自身への削孔によるコア観察、また孔内に CCD カメラを挿入し削孔壁を観察するホールカメラ等が用いられてきた。これらの方法は杭自身の一部を露出、破壊しなければならない“直接的調査”として、それぞれに特徴を有する。

材料の変形や破壊により放射される弾性波をアコースティック・エミッション(AE)と呼ぶ。例えば、地震による杭の破壊過程を考えれば、地震力により杭内部に蓄積されるひずみエネルギーがクラック生成、進展などにより解放される時に、光、熱、そして AE が確実に発生、放射される。破壊後の杭では、杭自身のクリープ変形や、緩い砂、粘性土地盤では、地盤の変形にともなう周面摩擦の増加などによる AE の発生が期待される。また、一旦塑性領域に達した材料からは、破壊時に受けた最大履歴荷重の超過が AE 発生的前提条件となる“カッパ-効果”<sup>1)</sup>は成立しない<sup>2)</sup>と報告されている。これらの事項から著者らは、間接的に杭の健全性が評価可能な「AE法によるコンクリート杭破損調査法」を考案し、実建物基礎に適用し手法の妥当性を検討してきた<sup>3),4)</sup>。本論文は、特に AE 診断手法の基礎的事項の検討結果を中心に述べるのと同時に、これまでの測定事例を紹介する。最初に、地盤中をどのように AE が伝播、減衰するのか、次に、どのような検出系が AE 検知に必要なものか、そして、杭破損部からの破壊音(AE)がいかなるものか、最後に適用事例を紹介するものである。

## 2. 地盤の AE 伝播特性

点音源から無限体内を伝播する実体波が球面状に広がる場合、波の広がりによって生ずる振幅の減衰を一般に幾何減衰と呼んでいる。波動の幾何減衰は、次のような一般式で表すことができる。

$$u = u_0 r^{-n} \quad (1)$$

ただし、 $u$  は振源から距離  $r$  なる地点の振幅、 $u_0$  は振源における振幅、 $r$  は振源からの距離であり、 $n$  は実体波と表面波によってそれぞれ次の値となる。

半無限体の自由表面を伝播する実体波	: $n=2$	
無限体を伝播する実体波	: $n=1$	(2)
表面波	: $n=1/2$	

以上のような幾何減衰に波動を伝える媒体の内部減衰(粘性減衰ともいう)を考慮することで、波動の振幅はさらに減衰する。媒体の内部減衰を考慮すれば、式(1)は次のように書換えられる。

$$u = u_0 e^{-\lambda r} r^{-n} \quad (3)$$

---

キーワード：地震、コンクリート杭、破損診断、アコースティック・エミッション

連絡先：〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472 電話 0471(98)7551・Fax 0471(98)7585

ここで、等価減衰比： $\lambda$ は次式によって表される。

$$\lambda = \frac{2\pi hf}{V} \quad (4)$$

ただし、 $h$  は媒体の内部減衰比、 $f$  は波動の振動数、 $V$  は波動の伝播速度である。

### 2.1 豊浦砂中の AE 伝播特性

減衰の小さい金属、コンクリートなどの AE 伝播特性は多数報告されているが、地盤中の報告は少ない。Fig.1 は著者らが行った豊浦標準砂中を伝わる AE 波の伝播特性検討結果の一例を示している。使用した AE センサは、数 kHz~100kHz に感度を有する 60kHz 共振型であり、擬似 AE はステンシル針により与え、与える力を筒形コイルへの入力電圧により安定、可変なものとした。同図における *dry* は相対湿度 50%の標準砂 AE 伝播特性を、*sat* は *dry* 実験後、間隙を二酸化炭素置換し、脱気水を浸透させたもの、*wet* は *sat* 実験後に排水し、24 時間放置した後の試験結果を示している。同図から、AE は数十 cm までは伝播距離の対数に比例して減衰するが、それを越えるとさらに減衰し、伝播距離が 1m を越えると急激にそのエネルギーを消散することがわかる。したがって、高周波数を対象とする AE 検出において、その規模が小さな場合、換言すれば微小クラックの生成、進展等において放射される AE 取得を考える場合、1m までがセンサー配置の一つの目安となる。

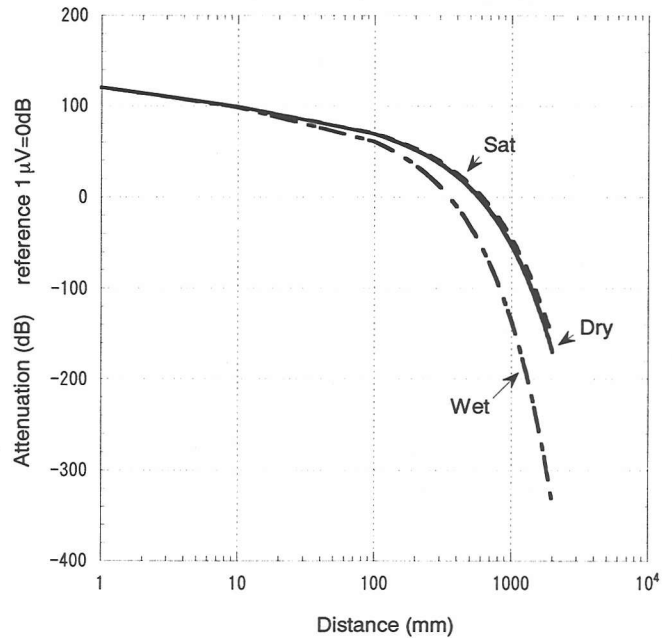


Fig. 1 豊浦標準砂中の AE 伝播特性

### 3. AE 検出導波棒

破壊監視や破損診断手法として AE 法を適用する際の技術的な問題点は、一般に高い周波数成分を含む微弱な AE 波を検出せねばならないことにある。そこで、Fig.2 に示すよう微弱な AE を検出センサーまで導く導波棒が考案、適用されてきた。導波棒には同図(a)に示す検出対象物の破壊による AE を媒体；地盤を通して直接検出しようとするもの<sup>5),6)</sup>、(b)のその変形を導波棒の変形（対象物と棒との摩擦を含む）としてとらえるもの<sup>7),8)</sup>があり、それぞれに特徴を有する。同(a)の場合は AE 源と検出系が離れているため 1)AE 波の地盤での特性、2)導波棒の材料特性の検討が必要となる。(b)では 1)は必要ないが 2)が必要となる他、対象材料の変形、破壊の影響が必ず導波棒の挙動に及ぶことが計測条件となる。杭診断では、(a)の場合の検討が必要となる。以下 2)導波棒の材料特性検討を述べる。

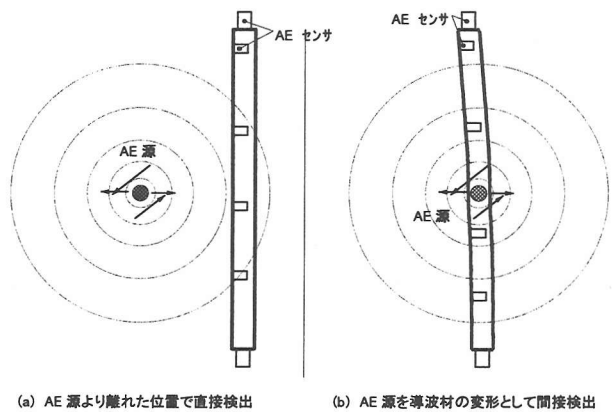


Fig. 2 導波棒による AE の検出方法

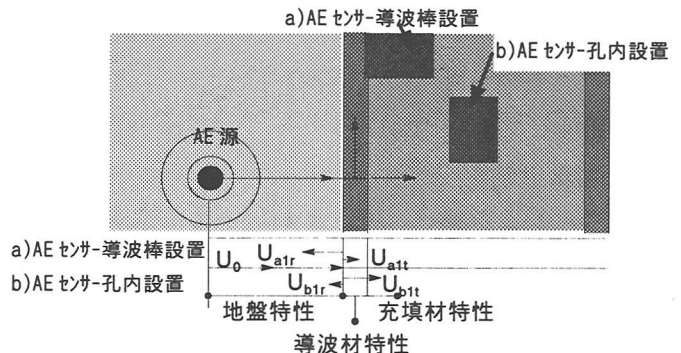


Fig. 3 考慮すべき AE 伝播特性(AE 源→導波棒→センサー)

### 3.1 AE 波伝播特性に基づく効果的な検出方法

地盤中の AE 伝播特性の模式図を Fig.3 に示す。地盤内で放出された AE (振幅;  $U_0$ ) は同図に示すように、一般に球面波として地盤内を伝播し、導波棒の外側まで到達する。次に、地盤 ( $Z_1$ ) と導波棒 ( $Z_2$ ) の境界面で両材料の材料特性 (主に音響インピーダンス;  $Z(=\rho V)$  として取扱われる) の違いによる反射、透過が生ずる。一般に金属材料のような硬いものに入射する場合、式(5)で定義される反射係数;  $r$  から反射が著しい。

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

$Z_1, Z_2$ : 媒質(1), (2)の音響インピーダンス

また、既述のとおり地盤、導波材ともに AE 伝播の広がりによる幾何学的減衰のほか、伝播媒質の粘性による内部減衰を受ける。同図はこれら伝播減衰、反射・透過による減衰を考慮して考えられる a)AE 源→導波材→センサー、b)AE 源→導波材→充填材→センサーの 2 つの例を模式的に示している。なお、a)は導波材中を伝播する AE を検出するようセンサーを導波材に固定しており、b)は導波材を介して充填材を伝播した AE を検出できる方法を表している。a)の場合、AE の地盤と導波材の境界面による反射、透過よりも導波材伝播を前提とした物性が優先され、金属棒などの減衰が小さい (インピーダンス大) 材料が用いられてきた。問題は境界面での反射 ( $U_{ar}$ )・透過 ( $U_{at}$ ) が考慮されておらず、例えば *E. Lord, Jr. et al*<sup>5)</sup> による導波棒の詳細特性検討にも触れられていない。理論的に得られる透過特性から微弱な AE を効率よく検出する方法とはいい難い。ただし、(b)に示す例ではこの限りではない。以下、著者らが考える効果的な AE 検出方法とその室内実験検証結果の一部を紹介する。(b)はその AE センサーまでの伝播模式図であり、導波管として内部を液体で満たしたプラスチック系材料を用い、AE センサーは孔内に吊下げ設置される。この方法では、次のような理論的優位性がある。1)地盤と導波材との反射 ( $U_{br}$ ) が小さく AE のほとんどが孔内に透過 ( $U_{bt}$ ) する。2)一旦管内へ透過した AE は、液体とプラスチック系材料のインピーダンス差によりほとんど管外へ漏すことなく液体中を伝播させることができる。

### 3.2 実験方法

Fig. 4 に導波管と AE センサー配置の一例を示す。導波材料として長さ 500mm、外径約 90mm のアルミニウム (中空、中実)、中空硬質塩化ビニルを用い、中空材の孔内は、空気と清水の場合を検討した。AE センサーは 60kHz 共振型 (10kHz~100kHz に感度特性を有する) を用い、その固定方法として (a)を想定した AE センサーの導波管固定 (導波材を伝播する AE を検出)、(b)の吊下げ固定 (液体 (水) を伝播する AE を検出) の場合を行った。導波管は相対密度 50% の乾燥豊浦標準砂中に埋設し、AE パルサー (最大 240V) を用い擬似 AE を検出センサーと同型より図に示す 5 点から出力した。なお、導波管外側とパルサーまでの距離は 3mm であり、擬似 AE の周波数特性は出力特性がインパルスであることから、ほぼ AE センサー周波数特性と同一と考えてよい。AE センサーで取得された AE 信号は、7リアンプで 40dB 増幅し、AEDSP カード (Mistras 2001, Pac 社製) で A/D 変換 (1MHz sampling, 16 bit, 2k words) 後、波形収録した。

### 3.3 実験結果および考察

実験結果を Fig.5, Fig.6 に示す。同図中には材料ごとの導波材の透過特性と、透過特性に導波材および充填材中の伝播特性が加えられた 2 つの値が示されている。

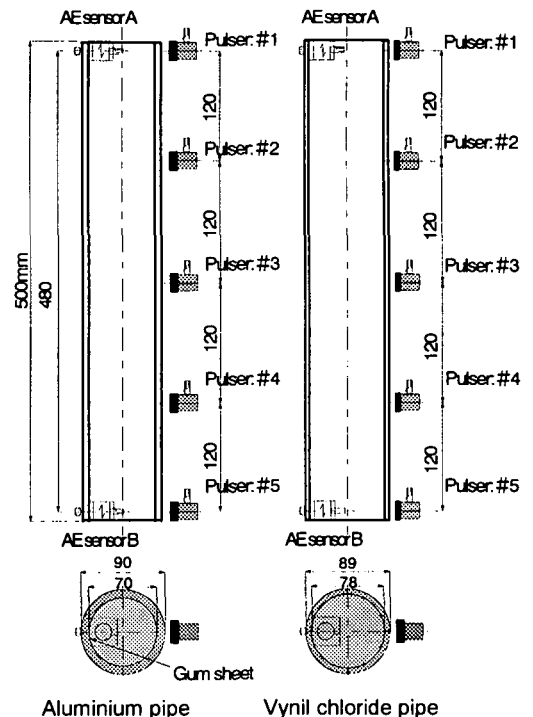


Fig. 4 導波管と AE センサーの配置

また、材料およびセンサー配置の表記は *Alum, non-fill, hor* のように順に導波材料、中空棒の孔内充填材、センサー感度方向を略して表す。なお、*Alum* はアルミニウム、*Vynil-chl* は硬質塩化ビニル、*w-fill* は孔内水充填、そして、*Hor* がセンサー受感面を導波管に固定したものの、*Ver* はセンサーを孔内に吊下げ設置し、水を伝わる AE を検出しようとするものを示す。透過特性のみを表した図は Fig.4 における各 AE センサー(A,B)直近の #1, #5 で擬似 AE 出力した場合の各 AE センサー検出平均値として、充填材の伝播特性を加えて表した図は #3 で擬似 AE を出力したときの両 AE センサー検出平均値として表している。なお、各検出値は擬似 AE、10 波の平均値として表しており、擬似 AE 出力を 140dB (1,000V) を基準に補正した。

検出値を対数表示した Fig.5 より、アルミニウムに設置した導波棒を用いる場合、AE の棒材への透過性が悪く、透過性のみを検討しても硬質塩化ビニルに比べ半分程度の値となる。ただし、Fig.4 に示すように塩化ビニルでの、水充填、鉛直配置検討結果は厳密には導波管内への透過と AE センサーまでの管内の水中伝播を含む値であり、更にアルミニウムへの透過特性は悪いものと判断できる。

検出値を線形表示した Fig.6 より、アルミニウムと硬質塩化ビニルの AE 伝播特性の違いが明白となる。透過のみを考慮した場合、アルミニウムは塩化ビニルの 0.001~0.003 の透過性しかなく、透過と材料の伝播特性を考慮した場合でも 0.009~0.02 倍となる。

#### 4. 既製コンクリート杭破壊時の AE 特性

既製コンクリート杭 PHC-B 種 ( $\phi: 400, \ell: 7m$ ) 破壊時の AE 特性検討を目的に杭の破壊実験を実施した。

(Photo 1 参照)

杭の破壊は、“曲げ”と“せん断”の 2 ケースとし、損傷(破壊)を“軽微”、“重度”の 2 程度となるようにした。ここで、軽微とはプレストレストコンクリートの特徴である“荷重により破壊点または、クラックが多数生じるまでに至った材料でも、除荷によりそのクラックが閉じる程度”を、また重度とは“除荷後もクラックが明白な損傷程度”を想定している。以下に、その結果の一部であるせん断破壊、重度の場合を抜粋し、実験方法と得られた AE 波形結果を述べる。

##### 4.1 実験方法

Fig.7 にせん断破壊実験の概要図を示す。基本的には 4 点曲げ荷重であるが、支点を荷重点近傍とするこ

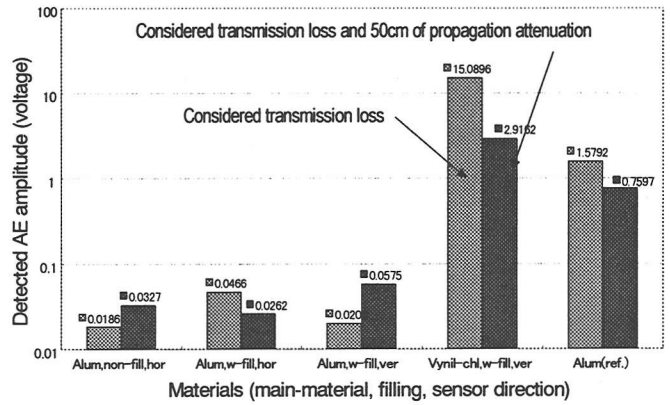


Fig. 5 材料ごとの AE 伝播特性 (対数電圧表示: Decibel)

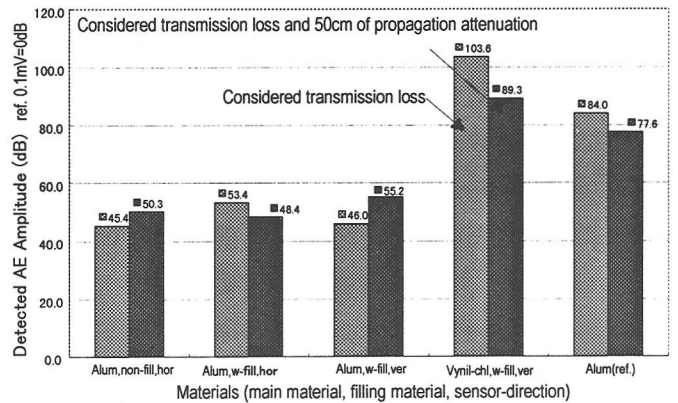


Fig. 6 材料ごとの AE 伝播特性 (線形電圧表示: Voltage)

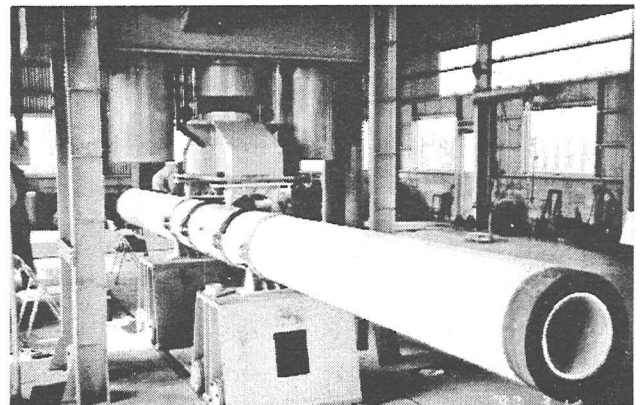


Photo 1 せん断破壊実験状況

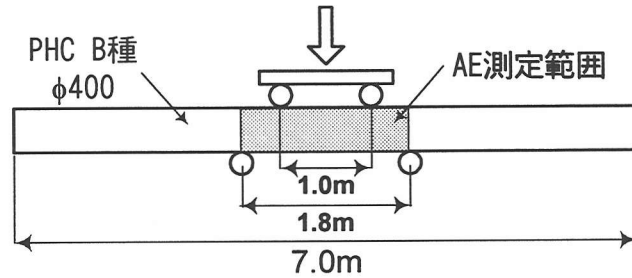


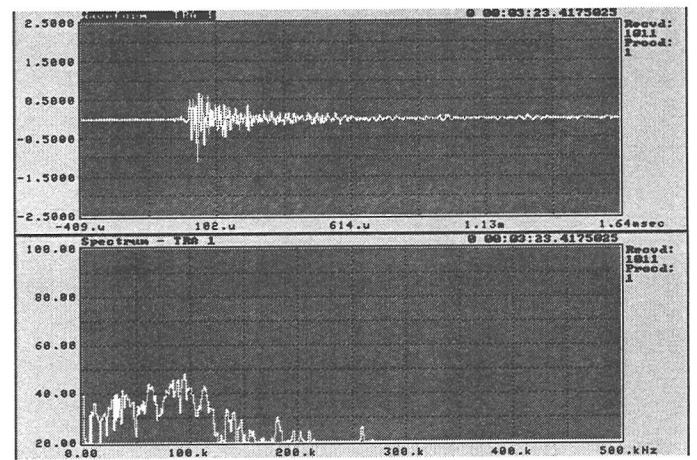
Fig. 7 せん断破壊実験概要図

とで、せん断力を狭い範囲に集中させる押し抜きせん断である。AE 計測は同図に示す測定範囲を網羅するよう 6 個の AE センサ（60kHz 共振型）を設置し行った。AE センサにより検出された AE は、7°リアップで 40dB 増幅し、しきい値 50dB を越えたものを AE 信号としてその AE パラメータおよび波形を記録した。

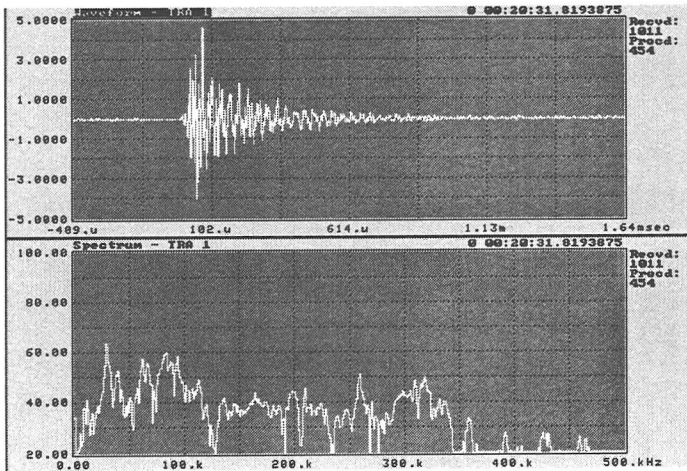
#### 4.2 実験結果

Fig.8 にせん断破壊実験により得られた AE 波形とその周波数スペクトルを示す。杭内部の微小破壊により生じたと考えられる小規模の AE 波形が(a)で、同種の波形が大規模の AE 波形が得られるまでは頻発、検出されている。また、そのうち中規模なものが(b)であり、発生傾向は(a)の小規模に比べ極めて少ない。(c)は目視可能なクラックの発生によると考えられる AE 波形である。これら AE 波形から、杭に生じる微小破壊での AE 波形は突発型と呼ばれる継続時間が短く、そのピークまでの立上がりが鋭いこと、また、規模の小さい微弱な AE であることから、使用した AE センサの感度特性を反映した 30kHz~100kHz 前後の周波数特性が卓越することがわかる。大規模な AE 波形は継続型と呼ばれる継続時間が長い AE で、微小クラックの連鎖により発生したものと考えられる。その周波数特性は低周波から高周波まで含んだものとなり、センサ特性を考慮すれば周波数に対してフラットな特性を有しているものといえる。

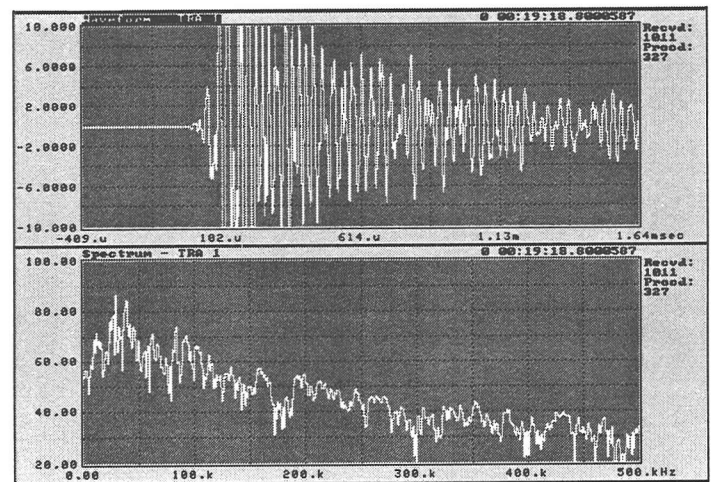
なお、“最大履歴荷重を超過しないと AE が発生しない”というカッター効果は、除荷によりたとえクラ



(a) 低荷重時に検出された小規模の AE 波形



(b) 低荷重時に検出された中規模の AE 波形



(c) クラック発生時に検出された大規模の AE 波形

Fig. 8 コンクリート杭破壊時の AE 波形及び周波数スペクトラム

クが閉口しても、載荷過程において一旦クラックが目視可能となった杭では成立しないことが認められた。したがって、塑性領域まで経験した杭は、低荷重時から AE を放射しやすい環境にあるものと考えられる。

## 5. 測定事例

### 5.1 高層建物基礎への適用

#### 5.1.1 建物・調査概要

1995 年兵庫県南部地震で被災したの高層建築物基礎（場所打杭： $\phi 1,100\text{mm}$ ， $\ell:10.5\text{m}$ ）に本手法を適用した。調査時には当該建物の上部は解体・撤去され、7-チング以下の基礎を残すのみであった。そこで、7-チング上部に重機を載せ変動荷重を与えて破損部位からの AE を誘発させた。AE の検出には、ホーリング孔内の任意深度にセンサーが設置可能である“サペソソ型導波棒<sup>9)</sup>”を用いた。また、他の調査（IT 試験，杭頭観察）も併せて実施し、本調査結果と比較検討した。

Fig.9 に AE 計測位置，および IT 試験・目視観察位置を示す。IT 試験・目視観察は図に示す A~D の 4 本の杭で行い，IT は杭頭より下 80cm 以深を，目視観察は杭頭より 1.1m までを対象に調査した。

Fig.10 に調査地盤の性状と AE 計測位置詳細断面図を示す。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，6m~7m（杭頭から 3.5m~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。AE 計測は，準備工として同図に示す計測位置で地表から 10m の深度まで削孔された 4 インチ径内に清水を充填し，サペソソ型導波棒（ $\ell:5\text{m}$ ，両端 60kHz 共振型 AE センサー内蔵）を吊り下げて計測した。計測位置は同図に示すゾーン上，ゾーン下の 2 ゾーンとし，ゾーン間の重複を半棒長（2.5m）とした。AE を誘発させる外力は 7-チング上部に重機を載せ，3 方向でのアーム伸縮により繰返し与えた。

#### 5.1.2 測定結果

1) IT 試験結果：Fig.11 に C 杭の IT 試験により得られた反射波形を示す。図中の 4.4m に破損であると推定される反射が認められた。その他の杭については，A 杭『健全性が高い』，B 杭『不明確』，D 杭『杭頭よ

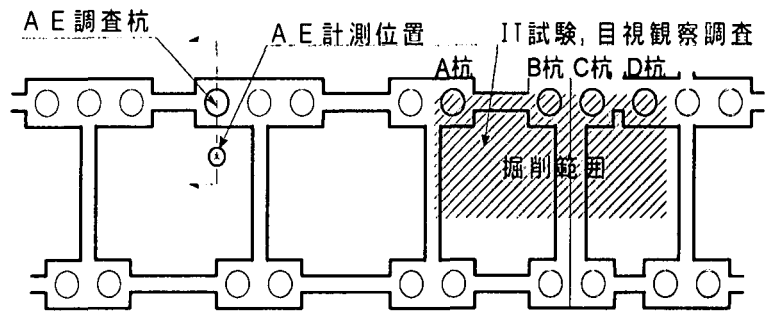


Fig. 9 調査位置平面図

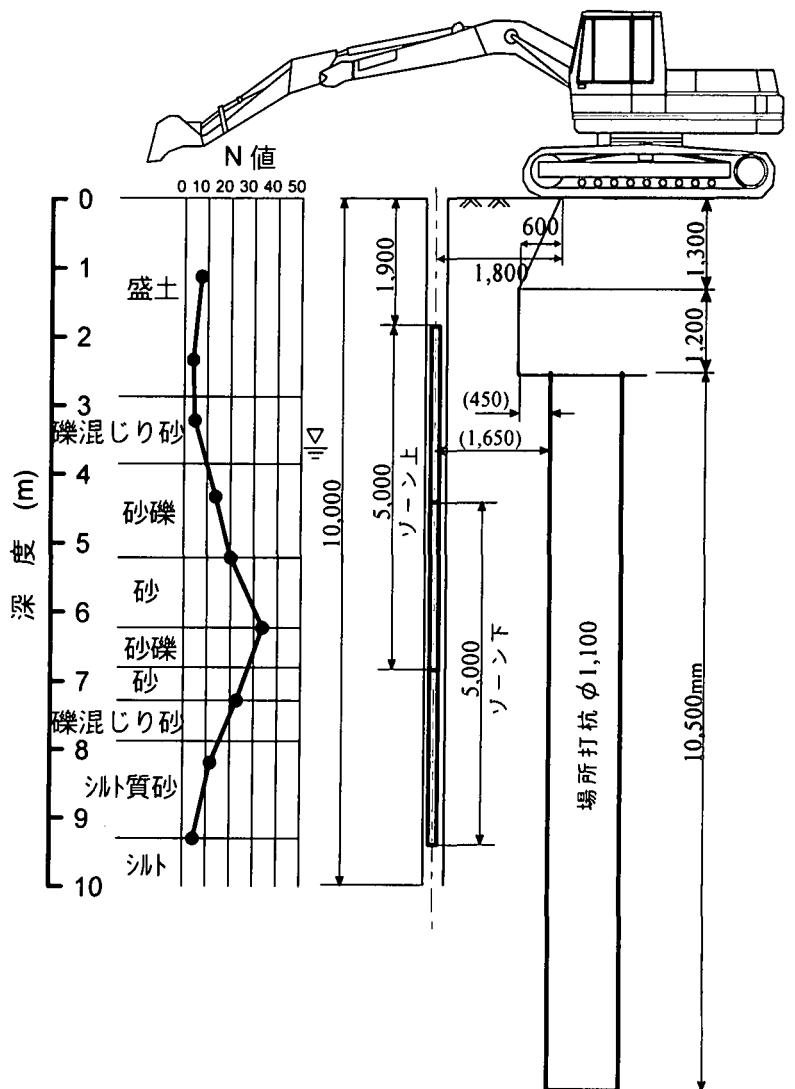


Fig. 10 地盤柱状図と計測位置断面詳細図

り 3.5m 付近に破損あり』との結果が得られた。

2) AE 計測結果 : Fig.12 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いて検出された AE を AE 源 (破壊源) の規模情報を与える AE リングダウンカウントを用い重み付した結果である。図より, AE が集中している『杭頭付近』および『杭頭より 3.5m~4.5m』に杭の破損が推定された。これら 2つの推定破損深度は, 同一の杭ではないが IT 試験より推定された破損部深度に合致している。

## 5.2 中層建物基礎への適用

### 5.2.1 建物・調査概要

調査対象は, 1995 年の兵庫県南部地震で被災した共同住宅である。建物と地盤の概要を Fig.13 に示す。なお, 計測期間は, アダプティブによる復旧工事が施工されており, 工事ともなう基礎杭への荷重再配分による AE の発生が期待された。計測時のアダプティブ工事進捗状況を Fig.14 に示す。AE 計測は, 両端に AE センサ(共振周波数 60kHz)を取付けた導波棒を対象杭から 1m 離れた位置に設置し行った。

### 5.2.2 測定結果

本調査は, 目視観察および IT 試験に先がけて実施した。計測された AE より, 暫定的に破損位置を推定した結果, 『杭頭部付近』, 『杭頭より 1.0m 付近』, 『杭頭より 2.2m 付近』, 『杭頭より 3.5m 付近』を破損位置として推定した。その後, 測定対象杭を目視観察し, 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れた。また, IT 試験結果から, 杭頭から 3.2m, 5.4m に破損が推定された。さらに, AE データは 1) 工事期間外データの抽出, 2) AE リングダウン計数, 立上り時間, 継続時間を用いたノイズデータ除去等を実施し詳細解析した結果, Fig.15 に示す位置が破損と推定された。同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 1 イベント当たりのリングダウンカウント (各区間の同カウント累計量を AE イベント数で除した値) である。AE 詳細解析の結果, 『杭頭~0.7m』, 『杭頭より 0.9m~1.2m』, 『杭頭より 1.7m~2.4m』, 『杭頭より 3.4m~3.7m』の 4箇所が破損と推定された。以上から, 本手法により暫定的に推定した破損位置と詳細解析により得られた位置は, ほぼ一致する結果となった。また, これらの破損推定位置は, 杭頭から 2m 付近を除き, 目視観

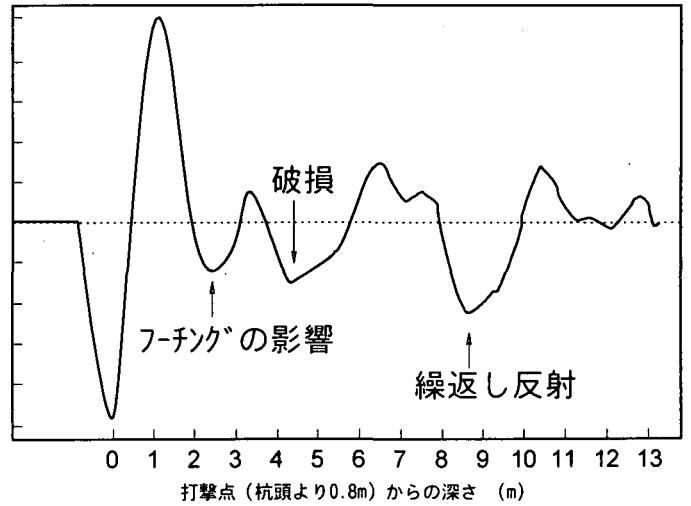


Fig. 11 C杭の反射波形

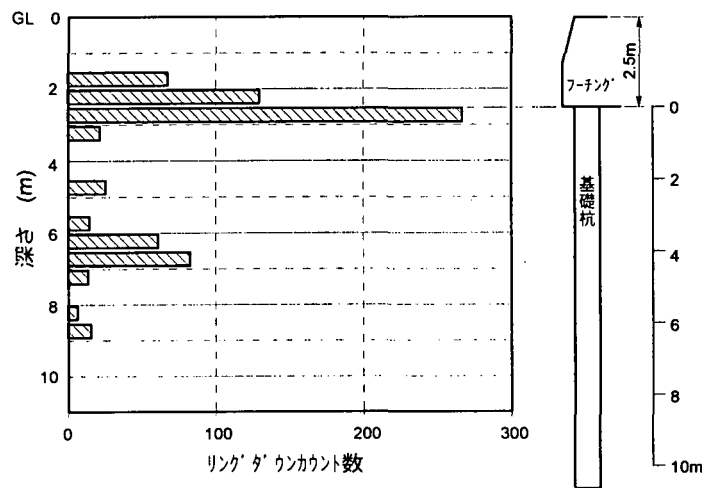


Fig. 12 AE計測結果

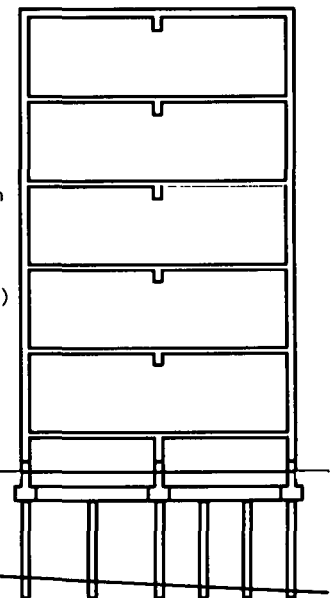
#### 建物概要

- 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

深度	地質	N値 50
1 m	盛土	●
2		●
3		●
4		●
5	風化花崗岩	●
6		●
7		●
8		●



※地下水位は確認されない

Fig. 13 建物と地盤の概要

察結果および IT 試験結果を反映するものであった。

## 6. 結論

- 1) 豊浦砂の AE 伝播特性から、コンクリート杭破損部から放射される弾性波を AE としてとらえる場合（高周波数を計測対象とする場合）、杭から 1m までが規模の小さな AE を検出する一つの目安となる。
- 2) AE 源から離れた位置で AE 計測する場合、地盤と導波材の透過特性を考慮した検出部が必要となる。ここで示したプラスティック系材料と管内水充填による方法は、金属材料と比べ効率の良い AE 透過、また伝播特性を有することが明らかとなった。
- 3) 既製コンクリート杭のせん断破壊実験から、微小クラックの生成、進展により放射される AE が 30~100kHz の周波数特性を有し、突発型であるのに対し、目視可能な大規模クラックの生成にともなう AE は平坦な周波数特性を有し、継続型であることが明らかとなった。
- 4) 本調査法を適用した調査結果から、AE 発生位置は破損部位置を反映するものであることが明らかとなった。

## 謝辞

本研究の AE 検討には、熊本大学 大津政康教授、重石光弘助教授に大変有益なご助言、ご指導をいただいた。また、既製コンクリート杭破壊時の AE 特性検討には、ヨコ（株）林隆浩氏、浅井陽一氏、吉田一男氏、西本憲正氏にご協力いただいた。また、現場への適用に際し、飛鳥建設（株）森伸一郎氏、岩城圭介氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表す次第である。

## 【参考文献】

- 1) J.Kaiser “Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von geräuschen bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen” *Arch. Eisenhüttenwesen.* 24, pp.43-45, 1953. (in German)
- 2) 長滝重義, 岡本享久, 綾田隆史, 湯山茂徳: AE 法による鉄筋コンクリート部材のひび割れ進展状況の把握, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.139-144, 1991.
- 3) 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.
- 4) 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, 第 51 回土木学会年次学術講演会 (第 III 部門), pp.30-31, 1996.
- 5) E. Lord, Jr. et al., “Utilization of steel rods as AE waveguides”, *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol.108, No.GT2, pp.300-305, Feb., 1982.
- 6) H.Geginald Hardy, Jr. et al., “Mechanical waveguides for use in AE/MS geotechnical applications” *JNSDI, Prog. AE IV*, pp.292-302, 1988.
- 7) I. Nakajima et al., “Application of the acoustic emission monitoring rod to land slide measurement”, *5th Con. AE/MS activity in geologic structures and materials*, pp.1-15, Jun., 1991.
- 8) 川上純, 服部弘通, 中尾健児: AE による地すべり活動のモニタリング手法に関する一考察, 地すべり第 30 巻 第 2 号, pp.17-24, 1993.
- 9) 岩城圭介, 森伸一郎, 塩谷智基, 境野典夫: AE を利用したコンクリート杭の破損調査法におけるサスペンション型導波棒の開発, 第 51 回土木学会年次学術講演会 (第 III 部門), pp.32-33, 1996.

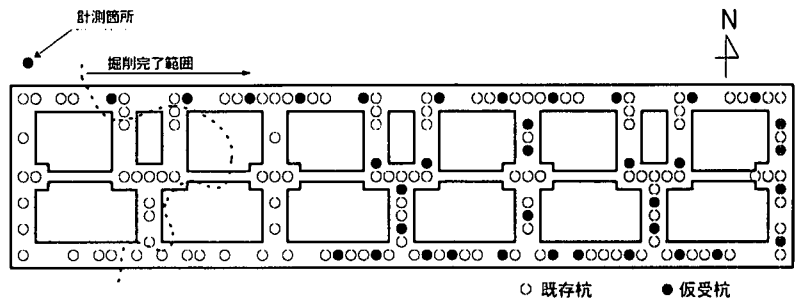


Fig. 14 計測時のアンダーピニング工事状況

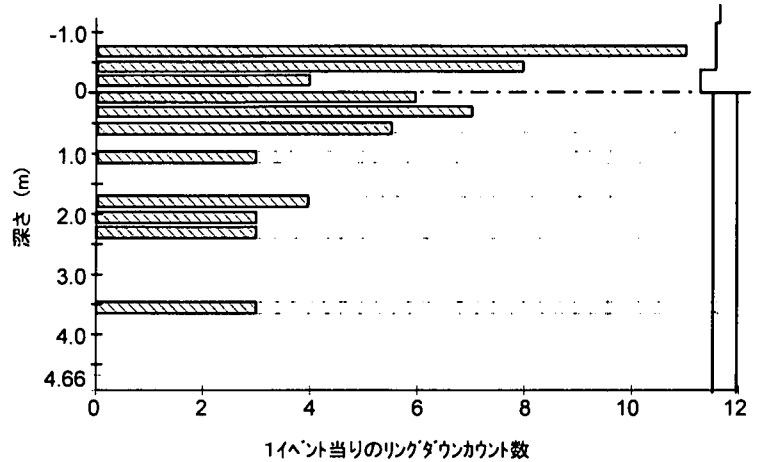


Fig. 15 AE 詳細解析結果