

フーチングを有するコンクリート杭の AE/衝撃弾性波による損傷調査

飛島建設技術研究所 正会員 塩谷智基
飛島建設技術研究所 正会員 三輪 滋
建設省土木研究所 正会員 市村靖光

1. はじめに

材料の破壊にともない発生する弾性波として AE (アコースティック・エミッション) が知られている. 図-1は, 実大PHC杭 (ϕ : 350 mm, l : 7 m) の繰返し曲げ試験時に得られた AE 特性である. 5回の繰返し荷重が与えられ, 最終的に破断に至った. ここで, 2回目の載荷にともなう AE アクティビティーに注目すると, AE 発現が先行最大荷重付近にあることがわかる. この場合, その材料は「安定した (健全な) 状態」であると判断される. 次に, 3回目, 4回目の載荷にともなう AE アクティビティーに着目する. これらの時, AE 発現は明らかに先行最大荷重より以前の荷重レベルにあり, その材料は「不安定 (損傷) 状態」であると判断される. このような AE に特異な現象を「カイザー効果」といい, 材料の健全性評価や岩盤初期地圧測定に利用されてきた. その一方, カイザー効果から「損傷した杭にわずかな荷重変動や増加を与えることで, AE の励起が可能である」といえる. 著者らは, 繰返し載荷時の AE 特性を検討することで, その杭の健全性が検討可能であること¹⁾, 実際に地盤に設置されたコンクリート杭の損傷調査に有効であること²⁾を報告してきた.

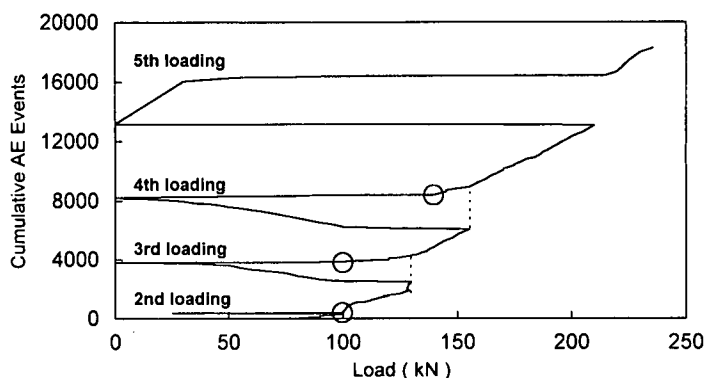


図-1 実大 PHC 杭の繰返し曲げ試験時の AE 特性¹⁾

本論文は, 既に水平載荷試験が実施され⁴⁾, 杭頭部を中心に損傷が認められている場所打ちコンクリート杭を試験対象とし, AE 法の適用性を論じる. 杭体への静的荷重や動的荷重は, 重機により与え, 得られた AE 源より, 杭の損傷位置を推定し, 杭内のボアホールカメラ観察や杭削孔で得られた採取コア観察, および杭体の速度検層結果と比較検討し, AE 調査法の適用性を検討する.

2. 実験概要

(1) 試験対象杭および AE 計測孔

図-2に試験対象杭と AE 計測孔の平面位置を示す. フーチング ($9.0 \times 9.0 \times 2.3$ m) に接合された9本の場所打ちコンクリート杭 (ϕ : 1.2 m, l : 28.9 m) のうち, その隅角に位置する杭: No.9について試験を行った. AE 計測は, 杭自身に削孔を施し, AE センサを設置する「杭内 AE 計測」と, 対象杭近傍の地盤を削孔, 塩化ビニル管を設置し AE センサを設置する「杭外 AE 計測」により行った. 杭内 AE 計測は特別に設計した取付け治具により, AE セン

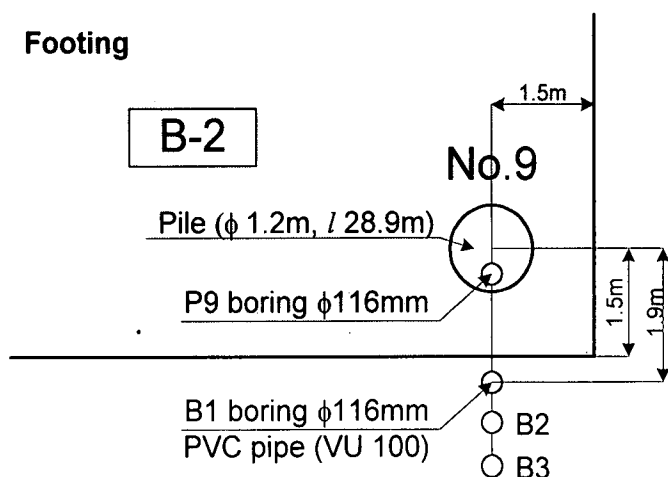


図-2 試験杭と AE 計測孔の平面位置

キーワード: アコースティック・エミッション, 場所打ちコンクリート杭, 損傷調査, フーチング
連絡先: 〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472, 電話 0471(98)7551, Fax. 0471(98)7586

サを杭中の削孔壁に圧着して計測し、杭外AE計測は塩化ビニル管に専用の治具によりセンサを所定の位置に固定、空隙を水充填することにより実施した。

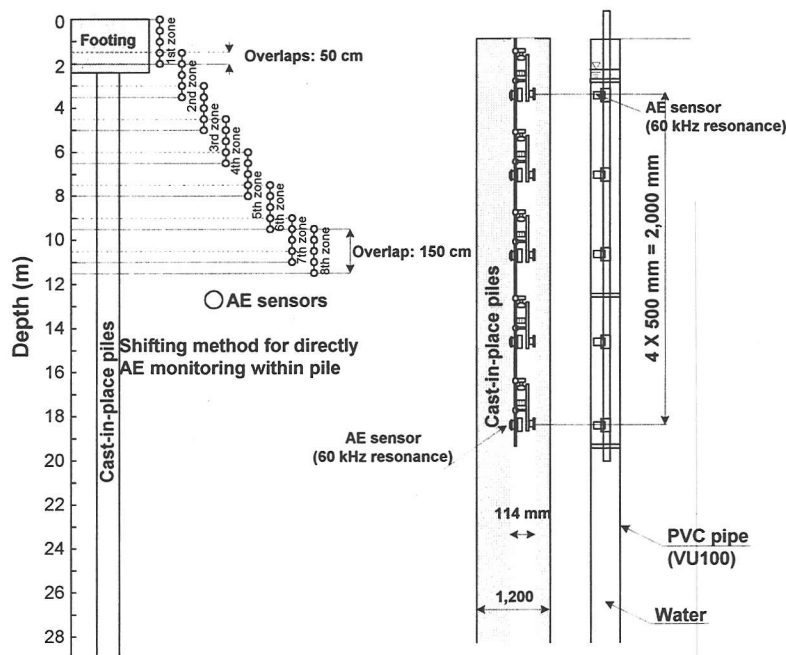


図-3 AE センサ群の配置図

(2) 試験深度と AE センサ設置方法

図-3にAEセンサ群の配置図を示す。AE計測対象深度は、フーチング表面より11.5 mで、「杭内AE計測」は、1つの計測範囲が2 mとなるように、5個のAEセンサ（60 kHz共振型）を50 cm間隔で取付けたセンサ群を、基本的に50 cmの重複を設けながら杭頭より挿入・固定して実施した。所定深度へのセンサ群の移動/圧着は、図-4に示すような「てこの原理」による治具を用いた。各センサ近傍に設置したラバーボールは、空気圧により膨張し、同時にバネが伸張し圧着部が下がり、移動可能となる。反対に、ボール収縮時には、バネも収縮し、圧着部が上昇、孔壁に定圧で固定される。このように、作製したAEセンサ設置装置は、ラバーボールの膨張がセンサ群の移動を可能にし、反対にその収縮がAEセンサの杭内壁固定を可能にする従来の装置とは相反する原理により設計されているところが特徴といえる。ラバーあるいは管に空気漏れが生じた場合も、バネにより杭内壁に圧着されたセンサには影響せず、安定したAE検出が可能となる。杭外のAE計測は、グラスファイバー棒に杭内計測と同種・同間隔のAEセンサを取付けたセンサ群を所定の深度に吊下げるように設置し、間隙を水で充填して行った。この方法は、一般に行われる金属製導波棒によるAE計測の約2倍の検出感度を有し、杭損傷部より放射され、AE計測孔まで到達したAE波を塩化ビニル管により水に効率的に透過させ、水を最終の伝播媒体としてAEセンサにより検出可能な方法である。

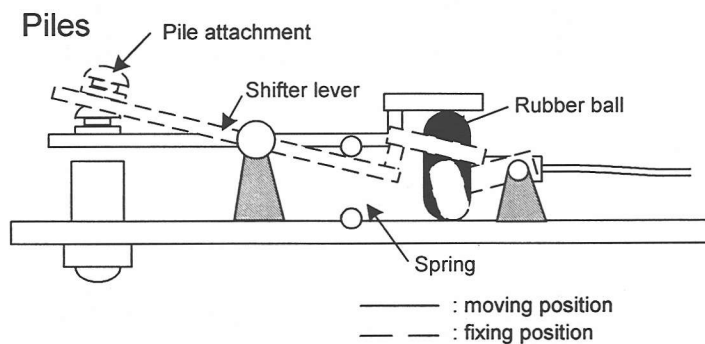


図-4 杭内 AE センサ設置装置

AEセンサは杭内、杭外ともに、40 dBの利得を有するプリアンプを内蔵した防水型AEセンサ（PAC社製）を用いた。AEセンサで検出された45 dB以上のAE信号は、AEDSPカード（Mistras, PAC社製）を介し、そのAEパラメータおよびAE波形を記録した。AE波形は、4k wordsのデータ長、休止時間を10 msとして収録した。

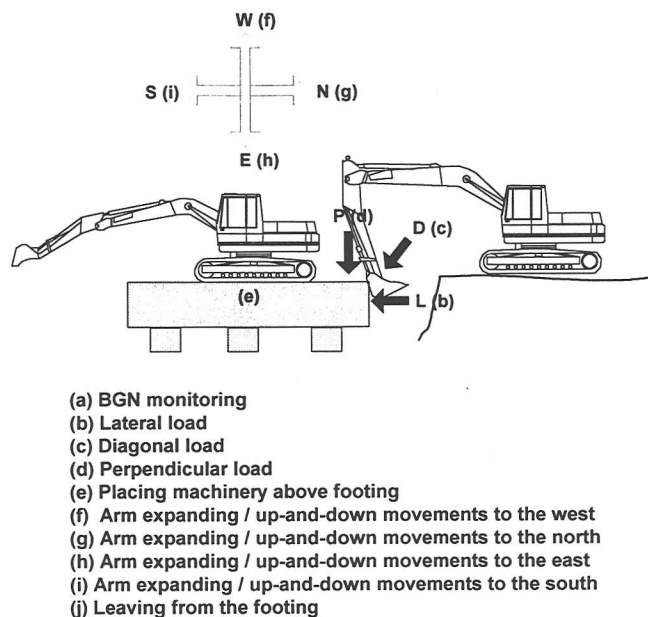


図-5 油圧ショベルによる外力変動フロー

(3) 油圧ショベルによる荷重変動

杭損傷部からのAE放射を励起させる目的で、杭と接合された上部のフーチングへ油圧ショベル(バケット容量0.59 m³, 重量11.8 tons)により小規模の静的荷重や動的荷重を与えた。基本的な一連の荷重変動を図-5に示す。

杭体の速度検層は、杭内AE試験に用いたAEセンサを用い、杭上部のフーチング表面を金属ハンマーにより打撃し、弾性波を励起させ行った。

3. 実験結果および考察

(1) ボアホールカメラおよびコア観察結果

AE計測結果と直接的に比較できる杭の損傷観察結果を整理し、図-6に示す。図-6(a)は、ボアホールカメラにより観察されたクラック本数を50 cm深度ごとに累積した図を表し、(b)は、ボーリング採取コアの観察写真結果を示している。(a)より、杭頭の損傷が大規模であり、7.0-8.0 m, 8.5-11.5 mにクラックの集中領域が認められる。(b)の採取コアより、ほぼ(a)の観察結果と同位置にクラックが認められるが、(a)の結果と異なり、フーチング内部の1.58-2.51 mに多

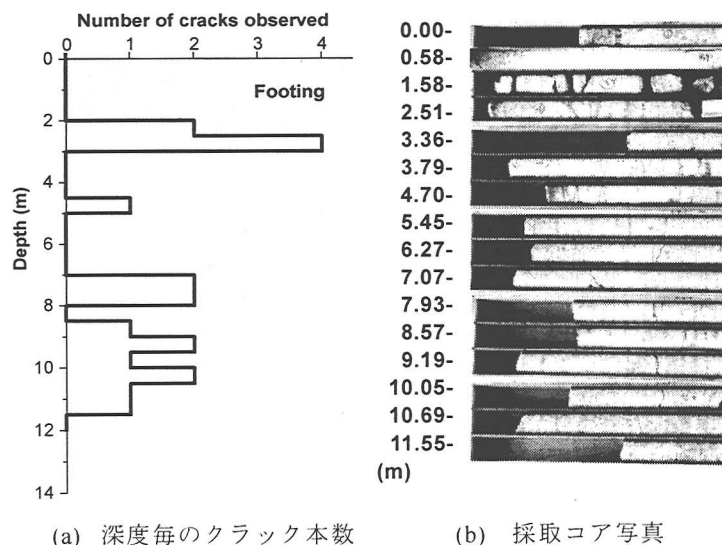
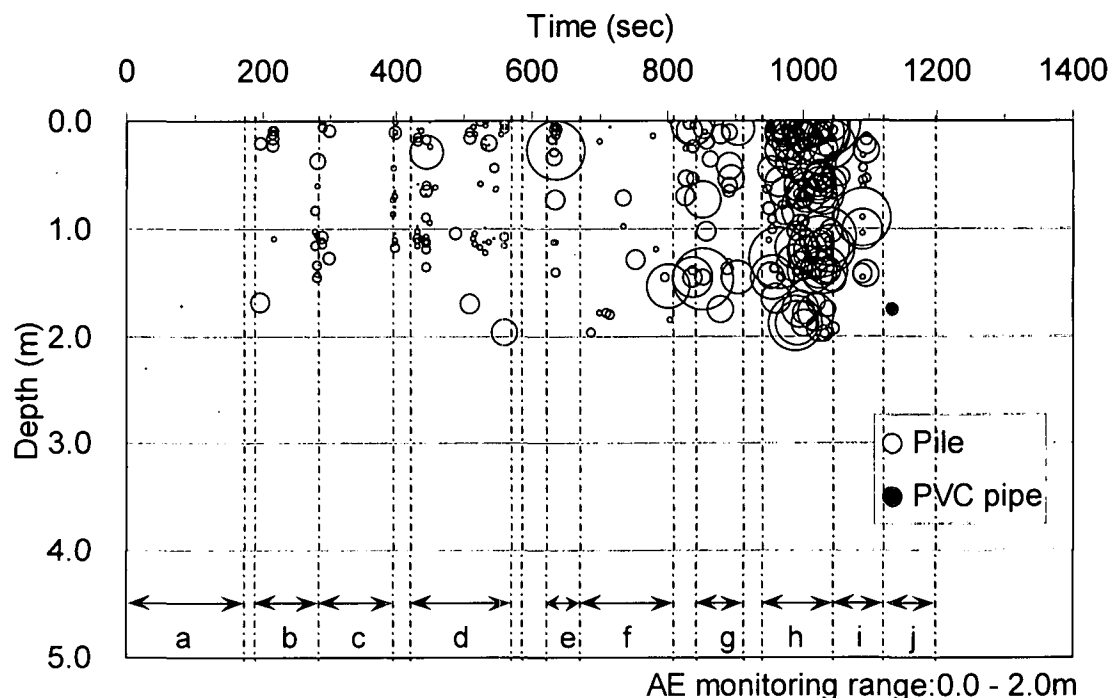


図-6 杭の損傷観察結果

くの採取コアの破断が観察される。この破断は削孔時に生じたと考えられ、それ以深のコアに潜在的クラック以外に同様な採取コアの乱れがないことから、「目視観察できない微視的クラックが杭内部に既に存在し、削孔による若干のねじり力で、そのクラックが進展・破断した」ことが推察される。使用したボアホールカメラの画像最小読みとり値は0.25 mmとされ、カメラにより観察・判断可能なクラックは、この幅以上である。ところで、鉄筋コンクリート材料の健全性を判断する指標の一つに表面クラック幅があり、既往の文献⁹⁾から、損傷をL, M, Hに分類するとき、対応するクラック幅の最小値はL, Mが0.12-0.20 mm, Hが0.5 mmと報告されている。このことから、カメラより判断可能な0.25 mmのクラック幅は、M (中) ~H (高) の損傷に対応し、それ以下の損傷レベルに対応したクラックを観察できなかった可能性もある。



(a) BGN(バックグラウンドノイズ), (b) フーチング側面載荷, (c) フーチング斜め載荷, (d) フーチング上面載荷, (e) 重機フーチング上載, (f) 西側でアーム振動, (g) 北側でアーム振動, (h) 東側でアーム振動, (i) 移動撤去, (j) BGN(バックグラウンドノイズ)

図-7 フーチング内の AE 源の経時変化

(2) フーチングでの AE 計測結果

フーチング上面から2 mまでのAE計測より得られたAE一次元位置標定結果の経時変化を図-7に示す。AE源は、リングダウンカウンタの大きさで反映した円として示し、白抜き円が杭内位置標定結果で、塗りつぶし円が、杭外の塩化ビニル管での杭外位置標定結果である。杭内AE計測結果から、(a)のBGN測定区間において有意なAE源は観察されなかった。(b)~(e)までのフーチング側面より载荷した区間でフーチング内部に多くのAE源が得られた。重機をフーチングに上載した直後の(e)で再度AE源はフーチング内部で得られ、アームの伸張や上げ下げによる(g)~(h)の区間においても大規模なAE源がフーチングの全領域にわたり観察された。AE源は、重機をフーチングから移動した区間 (i: 除荷時) にも認められた。一方、杭外AE計測結果から、有意なAE源は認められなかった。以上から、フーチング表面で観察されたAE源は、ある程度重機自身の振動による直接的な弾性波をAEとして検出した可能性があるものの、様々な方法によるフーチングへの载荷で、フーチング内部にAE源が多数認められたことから、対象とした杭が接合されたフーチングには、数多くの潜在クラックが存在していた可能性が高いと考えられ、この推測はコア観察結果から概ね妥当と判断された。

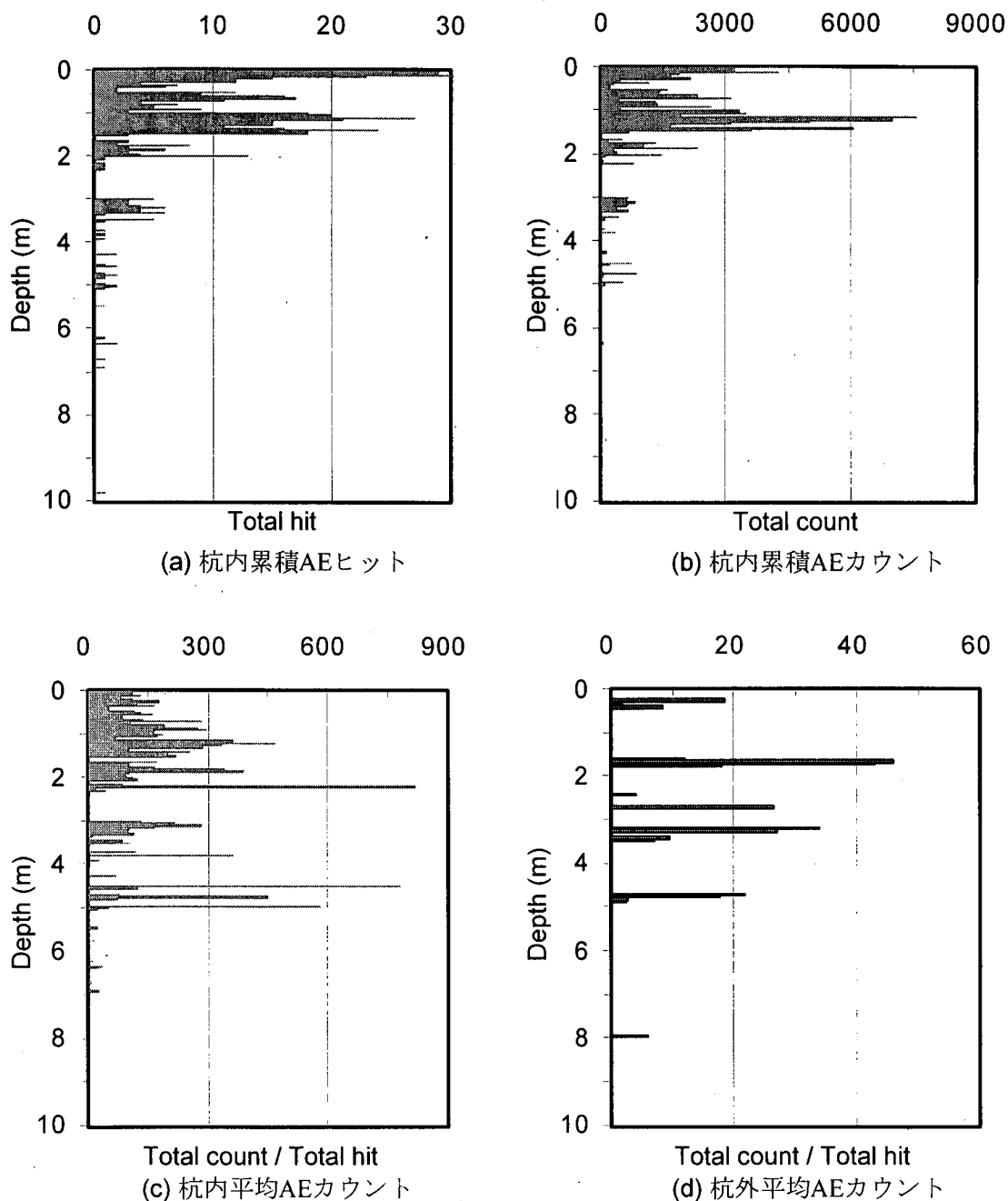


図-8 AE位置標定の深度に対するヒストグラム

(3) 深度 11.5 m までの AE 計測結果

図-8にAE位置標定結果の深度に対するヒストグラムを示す。図-8(a)は、杭内累積AEヒット、(b)は杭内累積AEカウント（リングダウンカウント）、(c)は各深度における平均カウント数（(b)を(a)で除したもの）、(d)は杭外のAE位置標定結果の(c)と同種の図を示している。(a)、(b)より、フーチング内に多数のAEイベントがあり、AE集中深度は1.0-1.5 m、2.0 mに見られる他、値は小さいが3.0-3.5 m、5.0 m付近に認められる。(c)のAEヒットの平均カウント数より、4.2-5.0 m、6.3-7.0 mのAE集中が明瞭になる。(d)の杭外AE計測において1.8 m、3.2 m、4.8 mにAE集中が認められる。これらは、杭内計測より判断された、杭の損傷箇所から放射されたAE波と時間的に同期していないが、AE集中深度はほぼ一致していた。

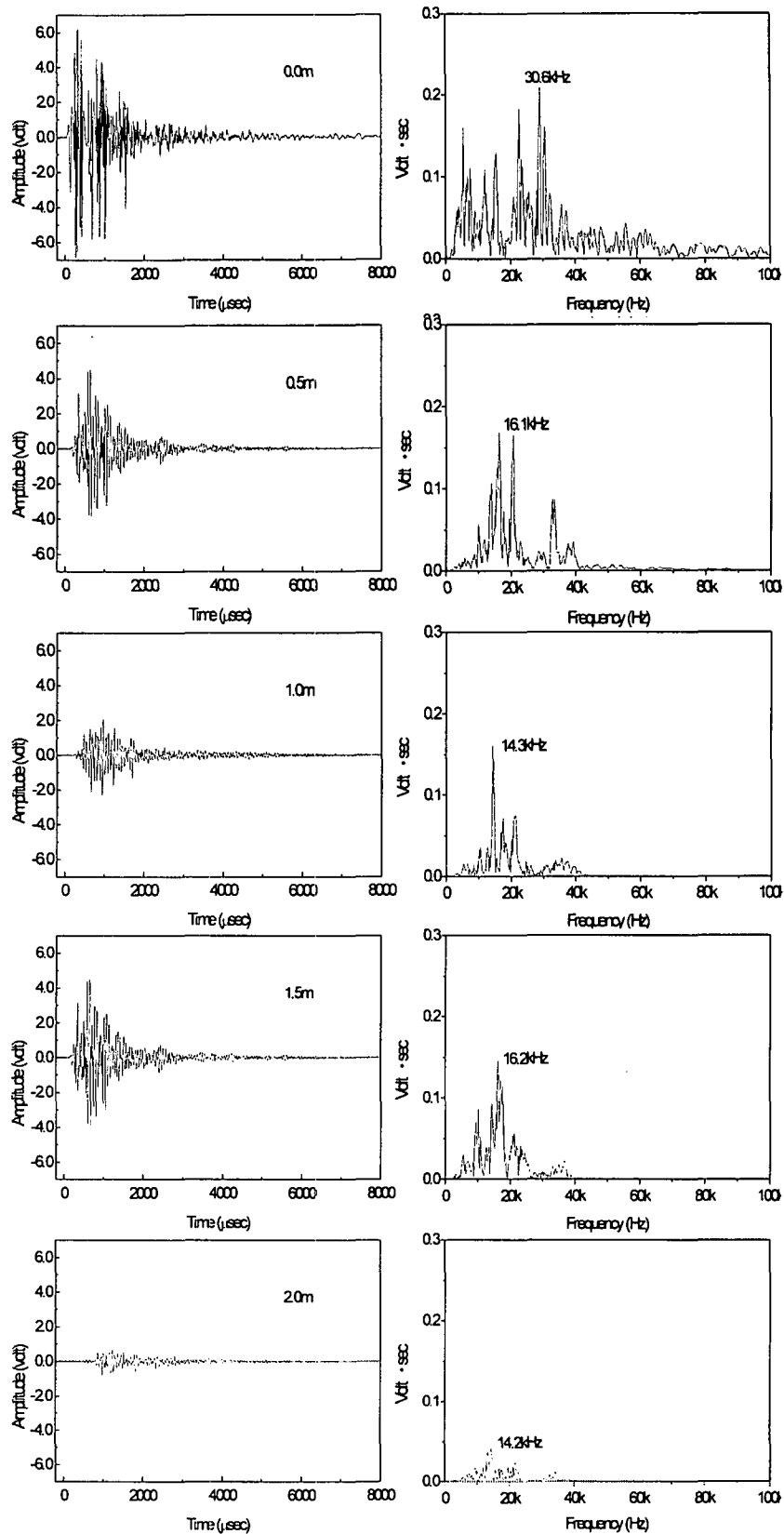


図-9 衝撃弾性波試験時に得られた弾性波波形と周波数スペクトル (0.0-2.0m)

(4) 速度検層結果

図-9に衝撃弾性波試験により得られた弾性波波形と周波数スペクトルを示す。弾性波の励起は金属ハンマによりフーチング表面で行った。図-9は上図から順に0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m深さのフーチング内に設置したAEセンサで計測した弾性波波形と周波数スペクトルである。AEセンサは、前述のAE計測に用いた60 kHz共振型を用いており、厳密な周波数特性は検討できないが、傾向として2.0 mの弾性波波形

の周波数特性はその上部で得られた弾性波波形に比べ各周波数成分特性が低く、到達時間が遅くなる。到達時間の遅れを各センサ間の速度として表したのが図-10である。

図-10は、各AEセンサで得られた弾性波の到達時刻より求めた杭内の弾性波速度を示している。ここで、各プロットは、伝播速度算出に用いたセンサ間中心、つまり、深さ1.0 m-1.5 m間の伝播速度は、深さ1.25 mの伝播速度として表している。一般に、場所打ちコンクリートの杭軸方向強度は、上部のコンクリートに比べ、下部の密度や強度が高いこと⁷⁾、また強度と弾性波速度にはある範囲で正の相関があること⁸⁾が知ら

れているが、ここでは極端に速度が低い深度のみに着目する。その場合、1.5-2.0 m、3.0-4.0 m、4.5-5.5 m、6.0-6.5 mに低い速度領域が認められ、これらの深度は杭内AE計測より推定された損傷位置、および杭外AE計測より推定された損傷位置に合致していた。

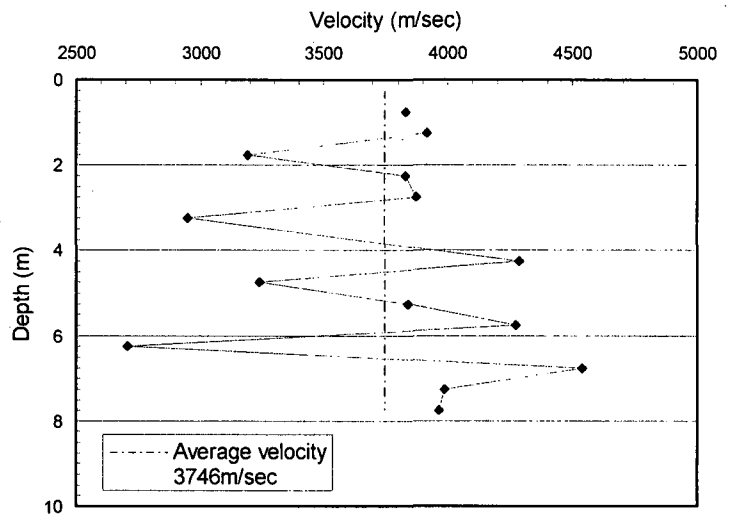


図-10 杭体中の弾性波速度

(5) 損傷位置推定結果のまとめ

AE法、ボアホールカメラ・採取コア観察、速度検層より推定された損傷位置を図-11にまとめる。以下の事項が認められた。

- 1) 杭頭付近の損傷がカメラから観察された。AEおよび速度検層から、フーチング内部での損傷が推定され、この位置はカメラ観察では認められなかったが、採取コアに多くの破断が確認された。
- 2) AEより3 m深さに損傷が推定され、この位置は速度検層結果より妥当であると判断された。しかし、カメラ観察からは認められなかった。
- 3) 5 m深さの損傷が全ての手法で推定された。
- 4) 杭内AEより、6.5 m～7.0 m深さに損傷が推定され、この部位はカメラ観察および速度検層結果と概ね一致していた。

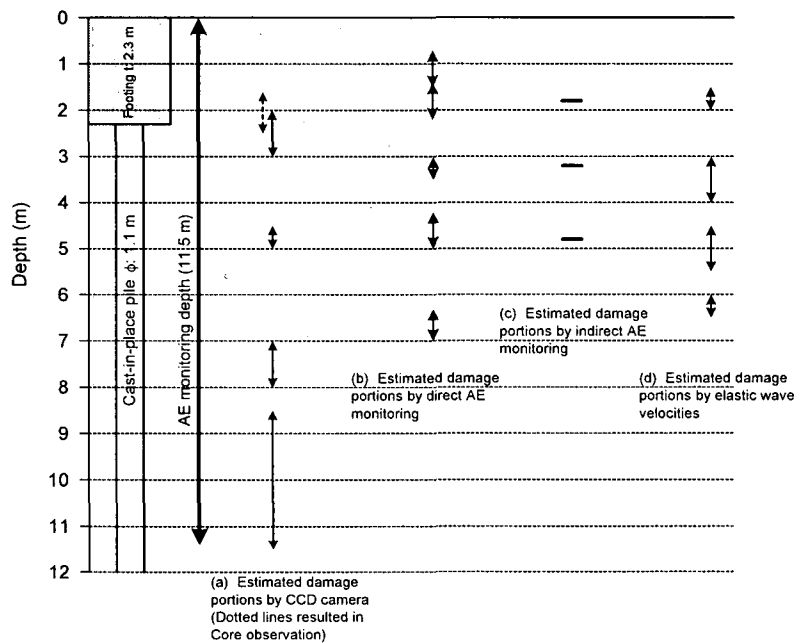


図-11 損傷位置推定結果のまとめ

4. 結論

フーチングに接合された場所打ちコンクリート杭の損傷調査にAE法を適用し、油圧ショベルによりAEを励起させた。ボアホールカメラ、コア観察結果、ならびに、杭体の速度検層結果と比較検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) AE計測より、フーチング内部に多くのAE源が認められたこと、また採取コア観察から多数のコアの破断がフーチング内で観察されたことから、損傷は、杭体のみならずフーチングまで至っている可能性があり、今後、杭体とフーチングの健全性を併せて議論しなければならない可能性が示唆された。
- 2) 平均AEカウントは、損傷位置の推定に有効である。
- 3) 速度検層結果より得られた低速度領域は、AE発生源位置と合致していた。
- 4) コンクリート杭の損傷を微視的なクラックまで議論する場合、0.1mm以下のクラックが観察可能なボアホールカメラが有効となる。

以上から、AE法のコンクリート杭損傷診断への適用性が確認された。特にAE法は、目視による方法では困難であった潜在クラックの存在を推定可能なほど敏感な診断法であり、ここで指摘したフーチング内破壊は、フーチング下部が低速速度領域であったこと、フーチングと場所打ちコンクリート杭とは鉄筋で連結されていることなどを考慮すると、合理的な推定結果であったと考えられる。最後に直接的には関係ないがRC柱の水平交番載荷試験時に基礎部で得られたAEモーメントテンソル解析結果⁹⁾を示す。柱下部基礎内部の損傷進行過程が見事に再現されている。

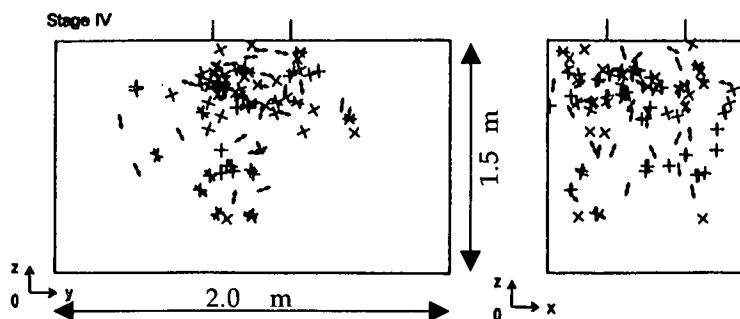


図-12 RC柱の交番載荷試験時のAE解析結果(文献9に加筆)

謝辞：本研究は、建設省土木研究所と阪神高速道路公団、(財)土木研究センターおよび民間12社による「橋梁基礎構造の調査手法の開発」の共同研究の一環として行われたものであり、実験を実施するにあたり、ご協力頂きました関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Shiotani, T., Sakaino, N., Shigeishi, M., Ohtsu, M., Asai, Y. and Hayashi, T.: AE Characteristics of Full-Scale Concrete-Piles under Bending and Shear Load, ASNT, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials*, pp. 163-172, 1998. 6.
- 2) 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法に洋r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.
- 3) Shiotani, T., N. Sakaino, M. Ohtsu and M. Shigeishi, "Damage Diagnosis of Concrete-Piles After Earthquakes by Acoustic Emission," KSNT, *Proc. Fourth Far East Conf. on Nondestructive Testing*, pp. 579-588, 1997. 10.
- 4) 坂本眞徳・林秀侃・森田悠紀雄・笹尾昌靖：実杭を用いた9本群杭の大変形水平載荷試験，第29回土質工学研究発表会講演集，pp. 1603-1606, 1994. 6.
- 5) 塩谷智基・境野典夫・大津政康・重石光弘：AEの地盤伝播特性とウェーブガイドによる検出方法，日本非破壊検査協会，第11回AE総合コンファレンス論文集，pp. 5-10, 1997. 11.
- 6) Yuyama, S., T. Okamoto, M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete by a Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission," *Materials Evaluation*, ASNT, 53, pp. 751-756, 1994.
- 7) 塚田正樹・難波伸介・山辺哲・中澤明夫・蕪鉄盛史・木村芳幹：兵庫県南部地震による場所打ちコンクリート杭の被害調査(その3：杭コンクリートの材料試験)，第32回地盤工学研究発表会講演集，1997. 7.
- 8) 十和田知三・野崎喜嗣・小林幸一：実大モデルによる超音波法，反発法および複合法の検討，日本建築学会構造系論文報告集，第428号，pp.25-33, 1991. 10.
- 9) 湯山茂徳・李正旺・伊東良浩・荒添正棋：AE法による柱水平交番載荷における柱基礎スタブ挙動に関する一考察，土木学会構造工学技術シリーズ No.5, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集，pp. 137-150, 1998. 7.