

コンクリート構造物非破壊探査システムの開発

株式会社青木建設	研究所	正会員	○孫 建生
"	"	"	塩月隆久
"	"	"	永井哲夫
"	"	"	池尻 健

1. はじめに

新設、既設構造物において、地震時の大きな揺れ、地盤の不同沈下、側方流動等によってその基礎構造物に亀裂などの損傷が生じることがある。これらの被害の復旧対策を講じる場合、多くの情報を得るための調査が必要である。しかし、多くの場合基礎構造物は地下にあり、被害箇所を直接確認することは通常困難である。例えば、兵庫県南部地震において杭、ケーソン等のコンクリート基礎構造物に多くの被害が生じたが、被害を直接確認することは容易ではなかった。このため、ボーリング孔を利用したポアホールカメラによる観察あるいは直接周囲を掘削し観察する掘り出し調査等が行われる。写真-1は兵庫県南部地震時に被害を受けた高速道路の高架基礎杭を掘り出して調査した結果の1例で、微細な亀裂が多く見受けられる。

しかし、この調査方法は、直接被害状態を観察できる利点がある反面、工期または費用的な制約から調査箇所を多く設定できない場合があり、また、周囲の環境条件等によっては実施が不可能な場合がある。簡便性などの理由から非破壊検査法が用いられ、特に基礎杭等の根入れの深い構造物の探査の場合、衝撃弾性波法が用いられているのが現状である。しかし、この方法はもともと新設杭の施工管理のために開発されたものであり、単本の杭、断面欠損など比較的大きな損傷の探査に適している反面、写真-1に示すように地震の損傷のような小さな亀裂（通常3~5mm以下）の探査には反射波の解読が難しく、また、フーチングなどの介在構造物があった場合、構造物の形状が複雑となり、表面波と端部、損傷部からの反射波とが混じり合い、判別できなくなることもあり、その適用範囲が限られてくる¹⁾。

2. 本システム開発の理論背景

構造物に衝撃を与えると、応力が波動の形(いわゆる応力波)で構造物内に伝わっていく。構造物の端部、断面変化部、材質の変化部など剛性の変化部分で反射が発生する。連続体の波動伝播理論では、剛性の変化率が分かれば波動の性質と関係なく、剛性変化部での反射、通過成分が決められる。

しかし、実際に構造物などに亀裂などの不連続面があると、不連続面で波の周波数の大きさと不連続面の動的剛性及び幅の組み合わせによって、波の伝播特性が変化し、不連続面の幅の大きさによって、通過・反射する波が周波数で選択される。これを「周波数選択特性」と呼ばれる。これによると、亀裂幅が数mm程度のような損傷の探査には高い周波数による検知が必要であり、衝撃弾性波法で扱うような低い周波数(2~4kHz以下)の波では亀裂を通過してほとんど反射波せず検知が困難であることとなる。

本システムは、この不連続面での波動の「周波数選択特性」を利用し、反射波の中から亀裂幅に応じた特定の周波数範囲を選択し抽出することを特徴とする。

3. フーチングを有するモデル杭の探査実験

本システムの有効性を検証するため、屋外のフーチング・杭によって構成される基礎構造物モデルを構築し、試験探査を行った。

キーワード： 地震被害、非破壊探査、亀裂、基礎構造物、波動

連絡先: 〒300-26 つくば市要 36-1 Tel.0298-77-1115 Fax.77-1136 E-mail:JianshengSun@aoki.co.jp

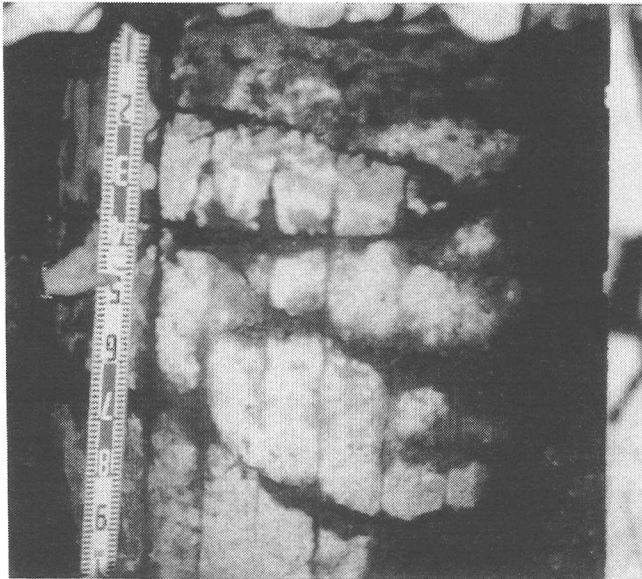


写真-1 基礎杭の地震被害状況

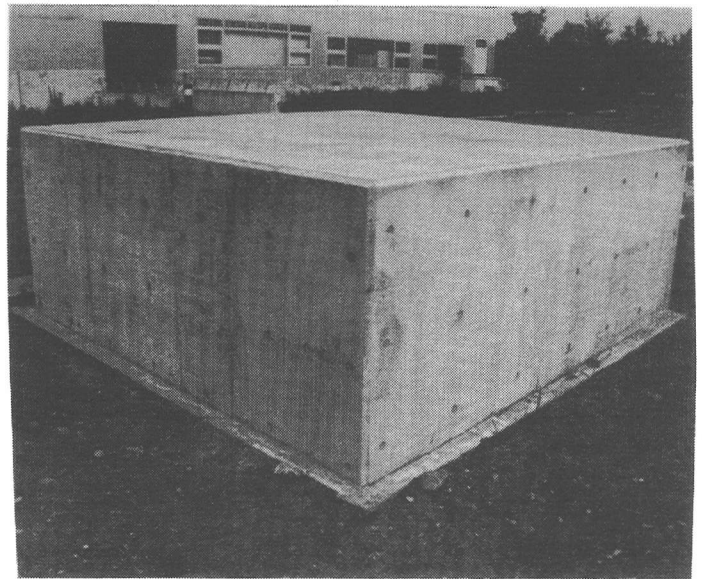


写真-2 フーチングを有する基礎杭の野外モデル

3.1 フーチングを有するモデル杭の概要

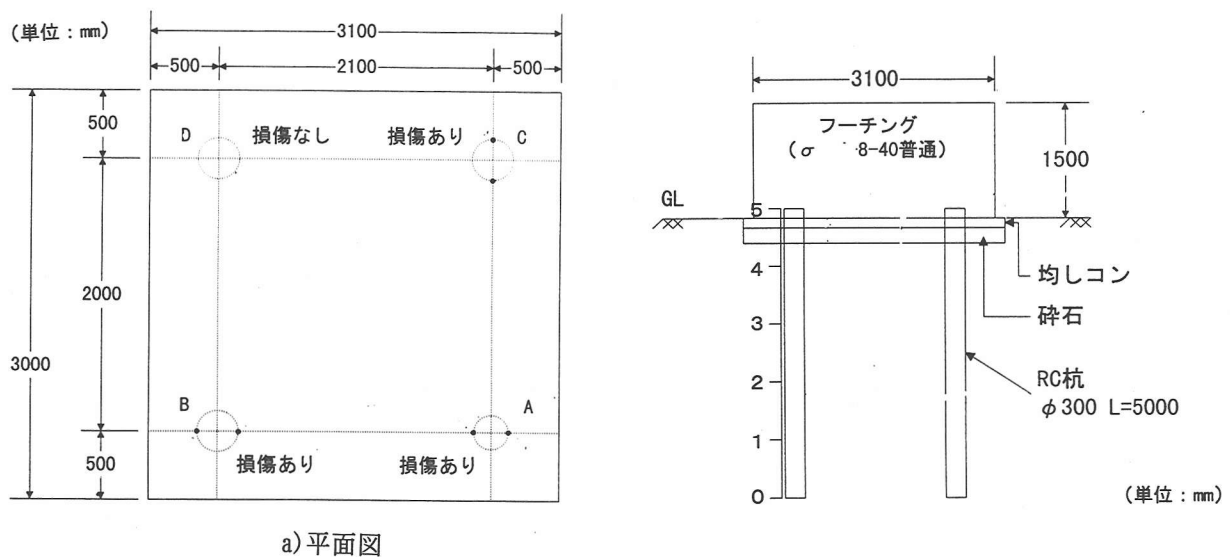
写真-2 は試験探査のために構築したフーチングを有する基礎杭の屋外モデルである。亀裂をを有する3本の杭と1本の健全な杭を図-1に示すような配置で建て込み、その上にフーチングを設置している。

a)基礎杭

杭材はRC中空杭で、 ϕ 300mm、L=5,000mm、亀裂はRC杭の品質管理用の曲げ試験装置により人工的に発生させている。写真-3に杭載荷時の状況を示す。このとき、載荷点を制御して所定の位置および本数になるように亀裂を発生させている。但し、2点載荷であるため、1回の載荷に載荷位置付近で2~3本の亀裂が同時に生じる場合もある。

杭の亀裂位置は、杭を建て込む前に地上部において、写真-4に示すように杭ごとに測線を2ヶ所（測線aおよび測線b）設け、各測線とそれぞれの亀裂が交差する点を杭頭から計測テープで測定して確認している。また、ここでは、参考のために亀裂の幅の計測も合わせて行った。亀裂の幅は、ほぼ0.3~1.0mmであった。

表-1には測定した4本杭の亀裂状態、位置を示している。杭Aの亀裂は長手方向中央部にあり、横断面全面に広がりを持つ(写真-4を参照)。杭Bの亀裂は長手方向杭先端部側寄りの位置で横断面内全面に広がりを



a)平面図

図-1 基礎杭野外モデルの構造図

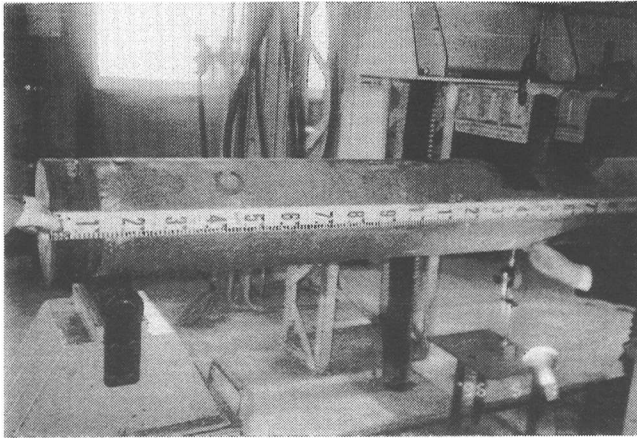


写真-3 杭に亀裂を生ずるための荷重状況

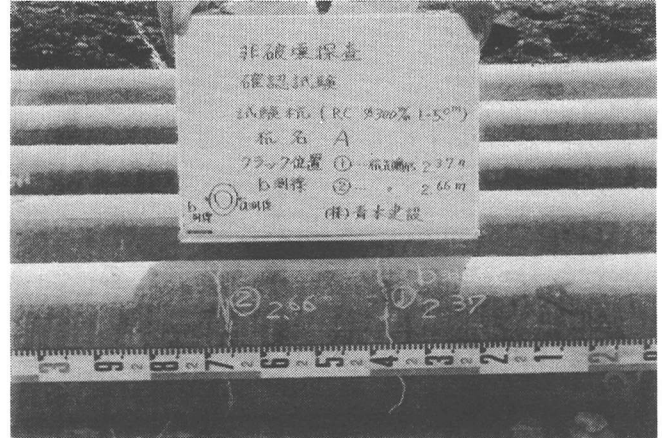


写真-4 亀裂の位置確認

表-1 各モデル杭のクラックの位置

杭の名称	荷重位置及びクラック	クラックのスケッチ図
杭A	杭のほぼ中央の1カ所に荷重した。目視によるクラックの位置は、杭先端から2.33~2.71mの間にある(フーチング上面から3.69~4.03m)	亀裂開口幅 0.3 mm (2.66~2.71m) 0.8 mm (2.33~2.37m) 2.66~2.71 2.33~2.37 杭先端部
杭B	杭先端からほぼ1.5mの1カ所で荷重した。目視によるクラックの位置は、杭先端から1.49~1.54mの間にある。(フーチング上面から4.86~4.91m)	亀裂開口幅 0.3~0.8 mm (1.45~1.54m) 1.49~1.54 杭先端部
杭C	杭先端からほぼ1.5mと3.5mの2カ所で荷重した。目視によるクラックの位置は、杭先端から1.45~1.70mの間と3.42mにある。(フーチング上面から2.98mと4.95~4.70m)	亀裂開口幅 0.3 mm (3.42m) 半断面のみ 0.3 mm (1.70m), 0.6~0.9 mm (1.45m) 3.42 1.70 1.45 杭先端部
杭D	荷重をしていない無損傷の杭 杭先端はフーチング上面から6.4m)	杭先端部

持つ。杭Cの亀裂は杭Bと同様の亀裂の他に、長手方向杭頭側寄りの位置で横断面内半面に広がりを持つ。杭Dは亀裂を生じさせていない無損傷の杭である。

杭の建て込みは、杭建て込み機で所定の位置までオーガー掘削し、杭を挿入して、杭の周囲を砂で水締めし埋戻した。但し、杭B、杭Dは地中に挿入した時、孔壁が一部崩壊したため所定位置まで挿入できず、約1mを1.5tonのハンマーで打ち込んでいる。

b) フーチングの構築

杭の設置の後、その上に高さ×幅×奥行き=1,500×3,100×3,000mmの現場打ちコンクリートのフーチングを構築した。

3.2 杭の亀裂と端部の探査試験:

写真-5に示すように、杭の中心位置のフーチングの表面にセンサーを付け、センサーから10cm位離れた

場所でハンマーでフーチング表面に衝撃を与え、センサーで杭端部と亀裂の反射波を受信する。

図-2~5はA,B,C,D 4本の杭の試験探査の結果である。図からわかるように、厚さ1.5mのフーチングを介したにもかかわらず、幅1mm位の亀裂と杭端部を極めて明確な波形で探査できた。違う位置に載荷し亀裂のある杭A,Bは、それぞれの亀裂の対応位置と端部に反射波があり、2カ所で載荷した杭Cは2カ所の亀裂の対応位置と端部に反射波があり、上部の半断面の亀裂からの反射波もはっきりとれている。杭Dは端部のみ反射波がある。この結果から、本シ

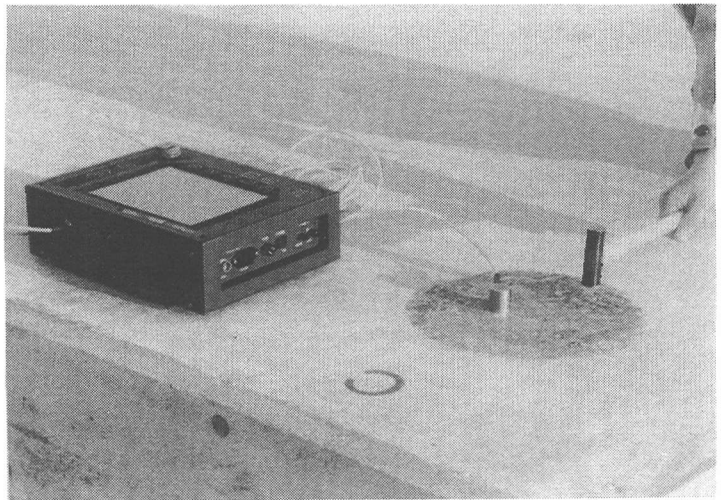


写真-5 杭亀裂の探査風景

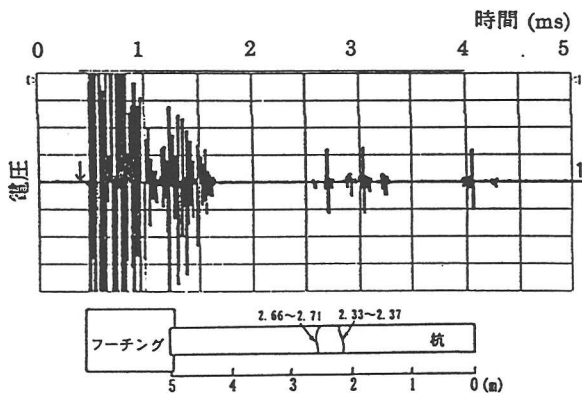


図-2 杭Aの探査結果と目視による亀裂位置の比較

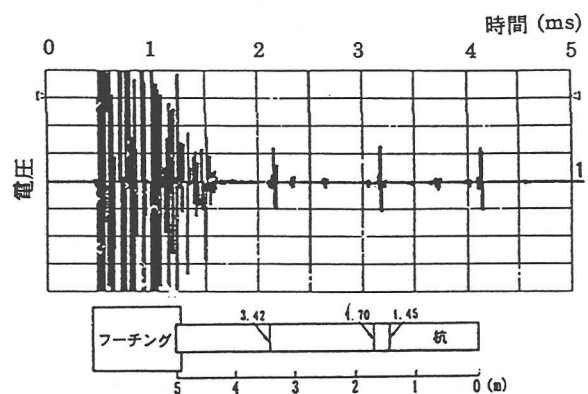


図-3 杭Bの探査結果と目視による亀裂位置の比較

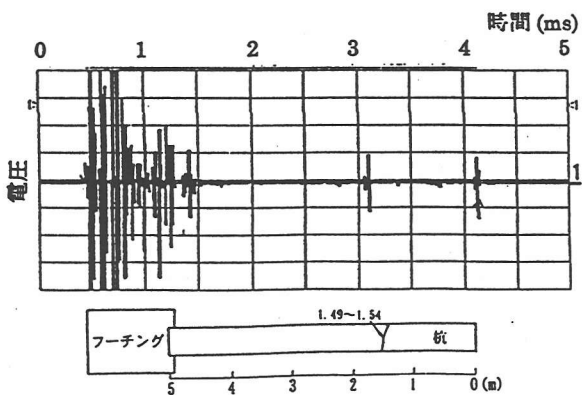


図-4 杭Cの探査結果と目視による亀裂位置の比較

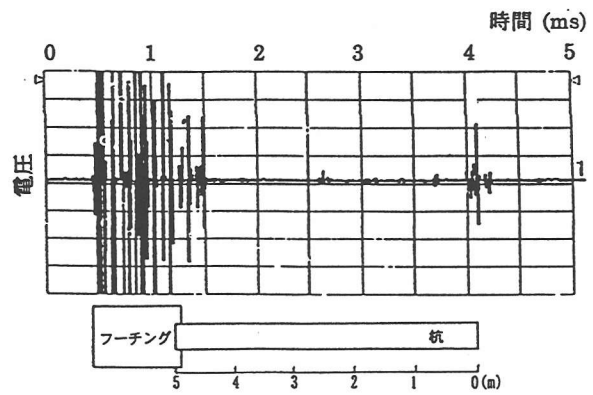


図-5 杭Dの探査結果

ステムは杭端部位置探査だけでなく、地震時に微小な被害を受けた基礎構造物の損傷探査に有効であると考えられる。

3.3 適正な打撃位置に関する実験

群杭のフーチングの上から探査する場合、探査位置と探査対象杭の位置関係を調べる必要がある。

上記のフーチング上に受振センサーを取り付け、同じくフーチングの上から打撃するハンマーの打撃位置を、杭φ300mmの外周円上を0cmとして、10、20、30、40、50cm離れた所に移して行く。このときの杭先端部の位置の探知精度の変化を調べる。

図-6~11は探査結果である。図から分かるように、撃位置が杭外周から0cm~10cmでは杭端部を探知することができた。打撃位置が杭位置から20cm~50cm離れると杭端部の反射波が認められない。このことか

ら、杭近傍にセンサー及び打撃位置を設置することが必要であり、同じフーチング下の他の杭の影響を受けない。今回の実験結果を利用することによって、フーチングあるいは床版コンクリートの下の杭の平面的な位置を探し出すことが可能であることを示唆するものと考えられる。

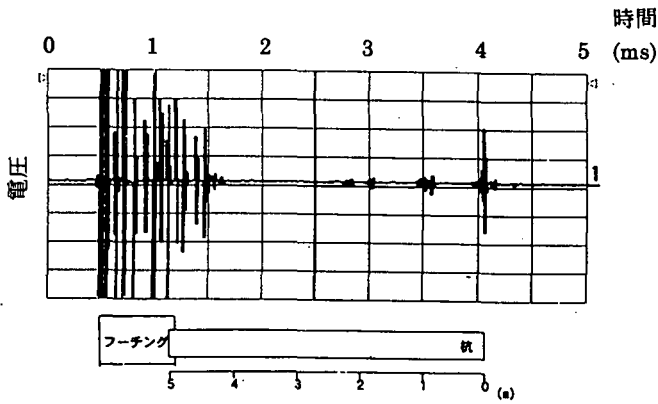


図-6 杭Dの0cm離れたところの探査結果

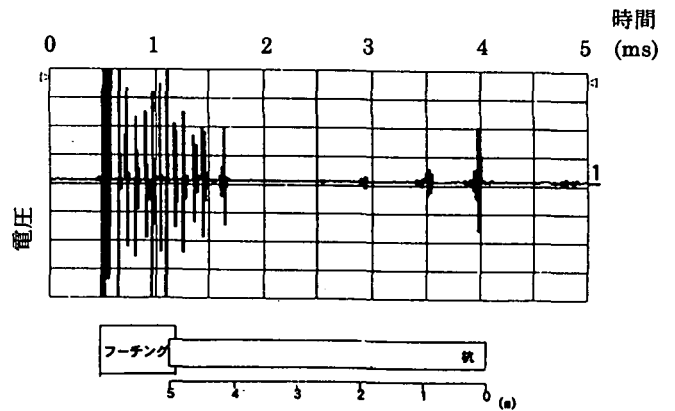


図-7 杭Dの10cm離れたところの探査結果

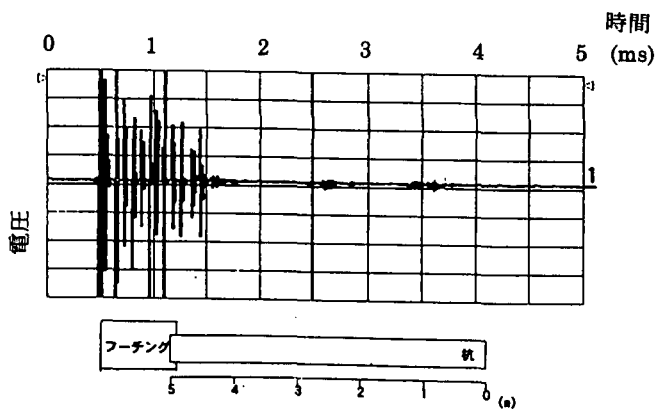


図-8 杭Dの20cm離れたところの探査結果

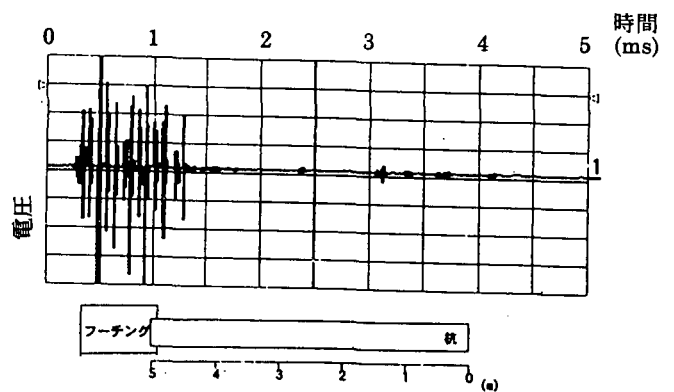


図-9 杭Dの30cm離れたところの探査結果

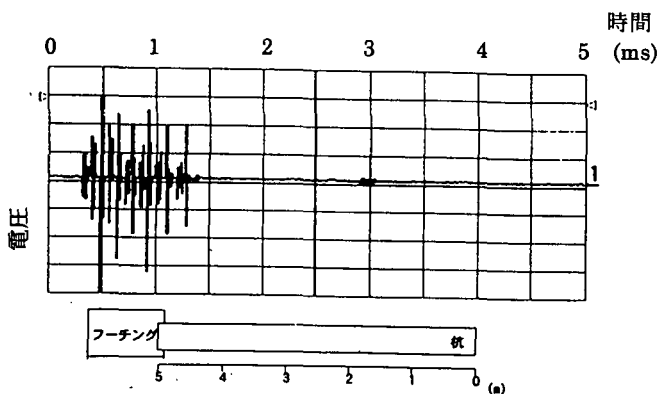


図-10 杭Dの40cm離れたところの探査結果

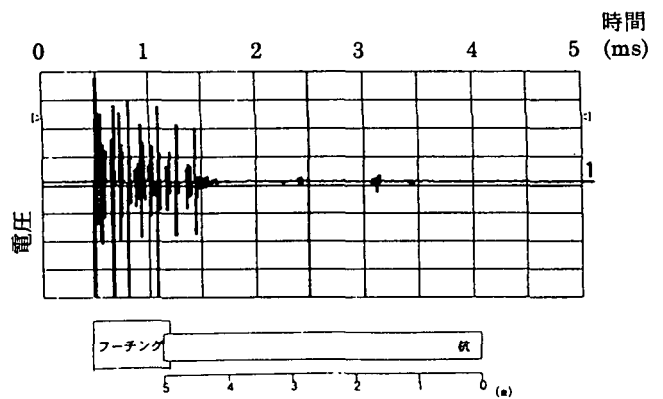


図-11 杭Dの50cm離れたところの探査結果

4. おわりに

兵庫県南部地震後、復旧のための地中構造物の損傷度の調査法として、地震被害を受けた基礎構造物の亀裂位置を検知する非破壊探査システムを開発した。その有効性を検証するため、フーチングを有する基礎杭の野外モデルを構築し、フーチングの表面から試験探査を行った。

- 1) 厚さ 1.5m のフーチングを介在して、長さ $L=5.0\text{m}$ の RC 杭の端部から、明確な反射波が得られ、杭の長さを正確に探知することができた。

- 2)厚さ 1.5m のフーチングを介在して、基礎杭の微細な亀裂(幅 0.3mm～1.0mm)の位置から、明確な反射波が得られ、人工亀裂の位置を正しく探知できた。
- 3)杭に数カ所に亀裂があっても、本システムを使用して、その位置と杭端部が探査できた。
- 4)杭に半断面の微細な亀裂があっても、その位置からの反射波も得られ、その位置を特定することができた。
- 5)厚さ 1.5m のフーチングを介在する場合、接收センサーと打撃位置は杭外周から 100mm 範囲内の時に、杭端部の反射波がとれるが、杭外周から 200mm～500mm 離れると、杭頭部からの反射波がとれなくなる。このことによって、本システムに使用する周波数範囲の波は優れた指向性が有することと言える。
- 6)この優れた指向性により、杭近傍にセンサーを設置し、打撃することが必要であると同時に、複雑な構造を持つ群杭のフーチングの上からも対象杭を特定して探査でき、他の杭の影響を無視できる。
- 7)また、この優れた指向性により、フーチングあるいは床版コンクリートの下の杭の平面的な位置を探し出すことも可能である。

今後、さらに本システムを実際の現場に適用し、非破壊探査結果と掘り出しなどの結果を比較することによって、システムの信頼性を高め、その適用範囲を明確したい。

参考文献：

- 1)[特集]計測技術 96：被災構造物を素早く診断する技術、日経コンストラクション、pp.37～47、1996.1.26
- 2)塩月隆久，孫 建生，永井哲夫，池尻 健：構造物(特に地下構造物)の損傷度非破壊探査システムの開発，第 32 回地盤工学研究発表会論文集、1997. 7
- 3)孫 建生，塩月隆久：構造物(特に地下構造物)の損傷度非破壊探査システムの適用事例，第 32 回地盤工学研究発表会論文集、1997. 7