

## 非破壊試験の橋脚基礎損傷調査への適用事例

フジエンジニアリング	正会員	仲田 慶 正
阪神高速道路公団	正会員	南 莊 淳
阪神高速道路公団	正会員	安田 扶 律
フジエンジニアリング	正会員	今田 和 夫

### 1. まえがき

平成7年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震により、神戸市を中心として壊滅的な被害を受けた。また、阪神高速道路においても3号神戸線あるいは5号湾岸線で一部高架橋の倒壊、橋脚の座沓、および落橋等の甚大な被害が発生したことは周知のとおりである。そこで、阪神高速道路公団としてもいち早く被害、損傷の実態把握のために、緊急点検や調査を実施し、補強対策にその結果を反映させてきた。

構造物の被害、損傷状況は目視確認できるものは実態把握が比較的容易であるが、地中構造物に関しては掘り出せる範囲が限られており基礎杭等になれば直接目視することは非常に困難である。特に、5号湾岸線は埋立地盤に建設されており、今回の地震による埋立地盤の液状化や流動化の発生により、地盤の水平方向の残留変位が確認されていることから、基礎杭の被災状況についての確認が急務であった。地中の基礎杭の調査手法としていくつかの方法があるが、

5号湾岸線では、現場条件や迅速性から衝撃弾性波を用いた非破壊試験(Sonic Integrity Test: 略称 SIT)を採用し、ボアホールカメラによる調査結果と整合をとりながら地盤変位、立地条件や土質構成等も考慮して、総合的な損傷把握につとめた。ここでは、SITの適応性をボアホールカメラ調査結果により検証するとともに、SITにおける阪神高速道路5号湾岸線の基礎杭損傷状況の分布を推定した一例を示すものである。

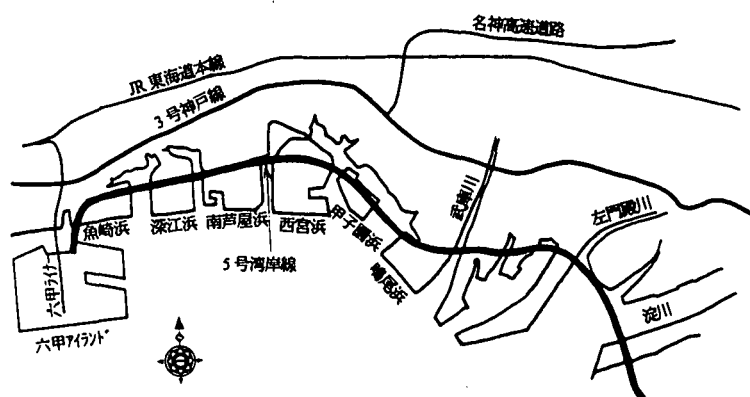


図-1 3号神戸線および5号湾岸線

### 2. 調査概要

#### 2.1 測定原理

杭頭に打撃が与えられると、その衝撃波が波動となって杭体内を伝播する。このとき、杭を一次元の弾性体とみなすと、杭中での波動は以下の波動方程式で示される。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $u$  は杭の振動変位(速度でも同じ)、 $c$  は杭体を伝播する波動の伝播速度で、 $c = \sqrt{E/\rho}$  ( $E$  は杭の弾性係数、 $\rho$  は杭体密度)である。また、 $x$  は打撃点を原点とする座標系での距離を示し、 $t$  は時間である。

この波動方程式(1)の特解の一つは次式で示される。

$$u = f(x-ct) + q(x+ct) \quad (2)$$

$f$  は杭系の正の方向に伝播する波動(進行波)を示すのに対し、 $q$  は杭系の負の方向に伝播する波動(後退波)を示す。

keywords: 基礎の損傷, 非破壊調査, 埋立地盤, クラック

〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 (大阪センタービル内) Tel 06-252-8121 Fax 06-252-4583

〒532 大阪市淀川区東三国 4-13-3

Tel 06-350-6130 Fax 06-350-6140

図-2 に示すような断面変化を持つ杭を想定すると、杭頭に与えられた打撃により発生する波動は進行波として杭先端方向に伝播する。断面変化点(A)に波動が達すると一部は透過して更に進行し、他は反射して後退波となって杭頭へ向かう。この場合の波動の透過率( $T$ )および反射率( $R$ )は次式で与えられる。

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

ここで、 $Z_1$ 、 $Z_2$  は各々断面変化点の上下における杭のインピーダンスで、杭の断面積を  $A$ 、弾性係数を  $E$  とすると、 $Z = AE/c$  で表される。杭の品質が同じ場合、透過率( $T$ )および反射率( $R$ )は断面積  $A$  によって示される。

$$T = \frac{2A_2}{A_1 + A_2}, R = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \quad (4)$$

すなわち、断面変化点(A)では、 $A_1 > A_2$  であり  $R > 0$  で反射波②は、入力波①と同符号となるが、断面変化点(B)では  $A_2 > A_1$  で  $R < 0$  となり、反射波③は入力波と逆符号となることがわかる。

したがって、杭体にクラックが発生していると微小区間で断面積が減少するため、クラック発生部で入力波と同符号の反射波が出現することになる。また、杭先端部(C)では、微小な範囲で自由端と考えられるため、入力波と同方向の反射波④が発生することになる。これら、反射波を加速度計により測定し、1 回積分して、速度波形に変換し、上述した根拠に基づいて波形の解釈を行っている。

ただし、実際の波形は構造的な変化のみでなく、地盤拘束の影響や杭体の品質変化等を受けて波形が変化する。また、顕著な損傷が発生していると、その部分で重複反射し、正弦波のような繰返し波が出現し、それ以深の状況が確認できない場合も生じる。このような場合は後述するように、測定データを波形処理することにより、解析的に波形判断する必要がある。

## 2.2 調査方法

本来 SIT は、杭頭部にセンサーを密着させ、その近傍をプラスチックハンマーで打撃することによって、杭体の断面変化等を測定するシステムである。

しかし、既設橋脚における基礎杭の損傷を調査する場合は、杭頭部を露出させることは不可能に近いといえる。そのため、図-3 に示すようにフーチング表面を掘り出し、杭直上のフーチング面から測定を行った。

## 2.3 測定位置の決定

SIT によってフーチング上面から杭体を調査する場合は、設計図書に基づき位置出しを行うことになるが、杭体の応答波形が得られる範囲(測定限界)を把握した上で調査を行うことが重要である。

そこで、図-4 に示したように、設計杭位置の中心から徐々に移動させ、測定した各々の応答波形から杭体に衝撃波が入力される測定限界角を実測により確認している<sup>1)</sup>。

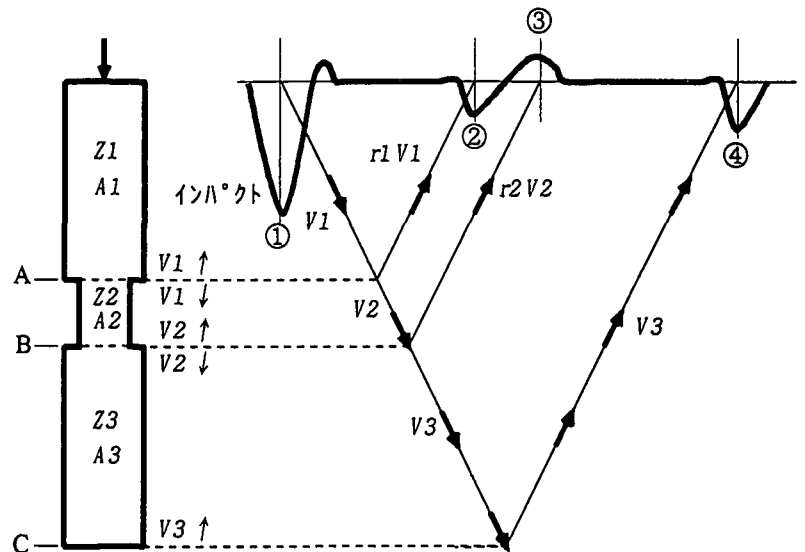


図-2 断面変化に伴う波形変化

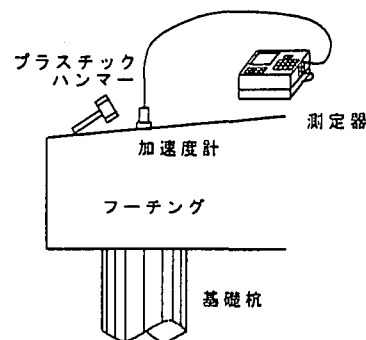


図-3 SIT 測定方法

杭直上となる①，②におけるサンプリング波形を見ると，杭先端反射が34m付近(▲印)に確認することができ，杭体の評価を行っているものと考えられる。

しかし，④のように杭芯から1.5m離れた位置で測定を行うと，サンプリング波形は3mピッチの繰返し波形（フーチング下面の反射波）が顕著であり，杭体に波動が入力されていないことがわかる。

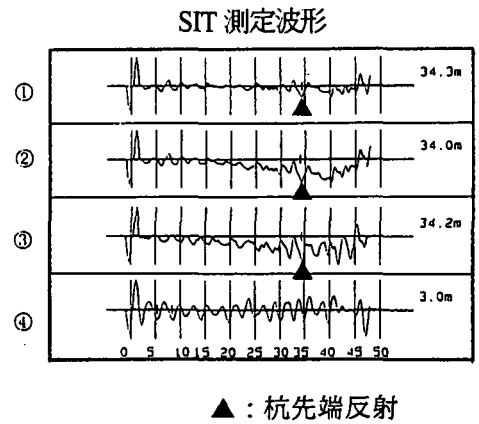
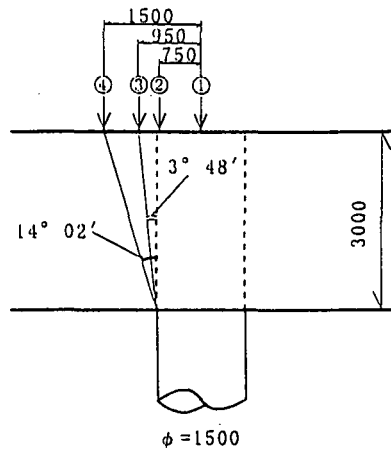


図-4 測定限界角算定図

また，③は杭芯から0.95m離れており，フーチングの繰返しが発生しているものの，杭先端反射も確認できる。

これらの結果から，厚さが3mのフーチングでは杭端部から0.2m ( $3^{\circ} 48'$ )離れた位置であれば杭体を確認することができるが，杭端部より0.75m ( $14^{\circ} 02'$ )離れると杭体内の応答を確認することができない。したがって，測定限界角は $5\sim 10^{\circ}$ 程度と考えられ，杭直上であれば杭体を評価することができるといえる。

### 3. 調査事例

阪神高速道路5号湾岸線においては，杭基礎，ケーソン基礎，連壁基礎が採用されている。今回調査の対象としたものは，杭基礎およびケーソン基礎であり，フーチングが存在する場合はフーチング上面から，オープンケーソンの場合はケーソン端部のパラペット上面より測定を行った。

測定位置については，設計杭中心位置およびケーソン壁面直上のフーチング上面とし測定を実施した。杭基礎については1本の杭に対して1箇所のデータを採用しているが，ケーソンについては断面が大きいため，1基礎当たり8本程度のデータを採用した。各基礎構造物におけるSIT結果を図-5に示した。

SIT-1～SIT-3はフーチング上面から測定した杭基礎の測定結果例である。また，SIT-4とSIT-5はケーソン基礎の測定結果例であるが，SIT-4についてはフーチング上面から測定したものであり，SIT-5はパラペット上面から測定した結果である。

SIT-1とSIT-2を比較してわかるように，波形の振幅によって健全と考えられる基礎杭と損傷(杭体の全体にクラックが発生している)と考えられる基礎杭を判別できる。そして，SIT-4およびSIT-5のケーソン基礎については，基礎の断面変化位置において波形変化が発生しているのみであることから健全であるものと考えられた。

SIT-3についてはSIT-2と同様に杭体全体に波形振幅が発生しており，原波形の振幅からでは杭体全体にクラックが発生した杭と評価される。しかし，波形上段の杭模式図に杭頭掘削による外観目視クラック(実線)とボアホールカメラ調査によって確認したクラック(破線)を示したが，クラックの発生量は2本ないしは3本しか確認されていない。これは，原波形の波形発生状況がほぼ等間隔に発生していることから，杭頭部(フーチング下端)付近に発生した損傷の繰返し波が含まれているものと思われる，繰返し波形以外の波形変化である1.8m, 8m付近の波形変化がクラックによるものであると考えられる。

このように，原波形では，波形変化より断面変化と損傷の判定を行うことに技術的判断を必要とすることや，フーチング上面から測定した場合には，杭頭損傷やフーチング下端の繰返しの影響等で波形判断が困難となる。そこで，構造的に断面変化がない杭基礎を対象として波形分析を原波形に加えることによって，損傷およびフーチング厚の繰返し波の影響を排除するとともに，クラック発生位置を比較的簡便に確認できるようにデータ処理を行うこととした。詳細は次章に示す。

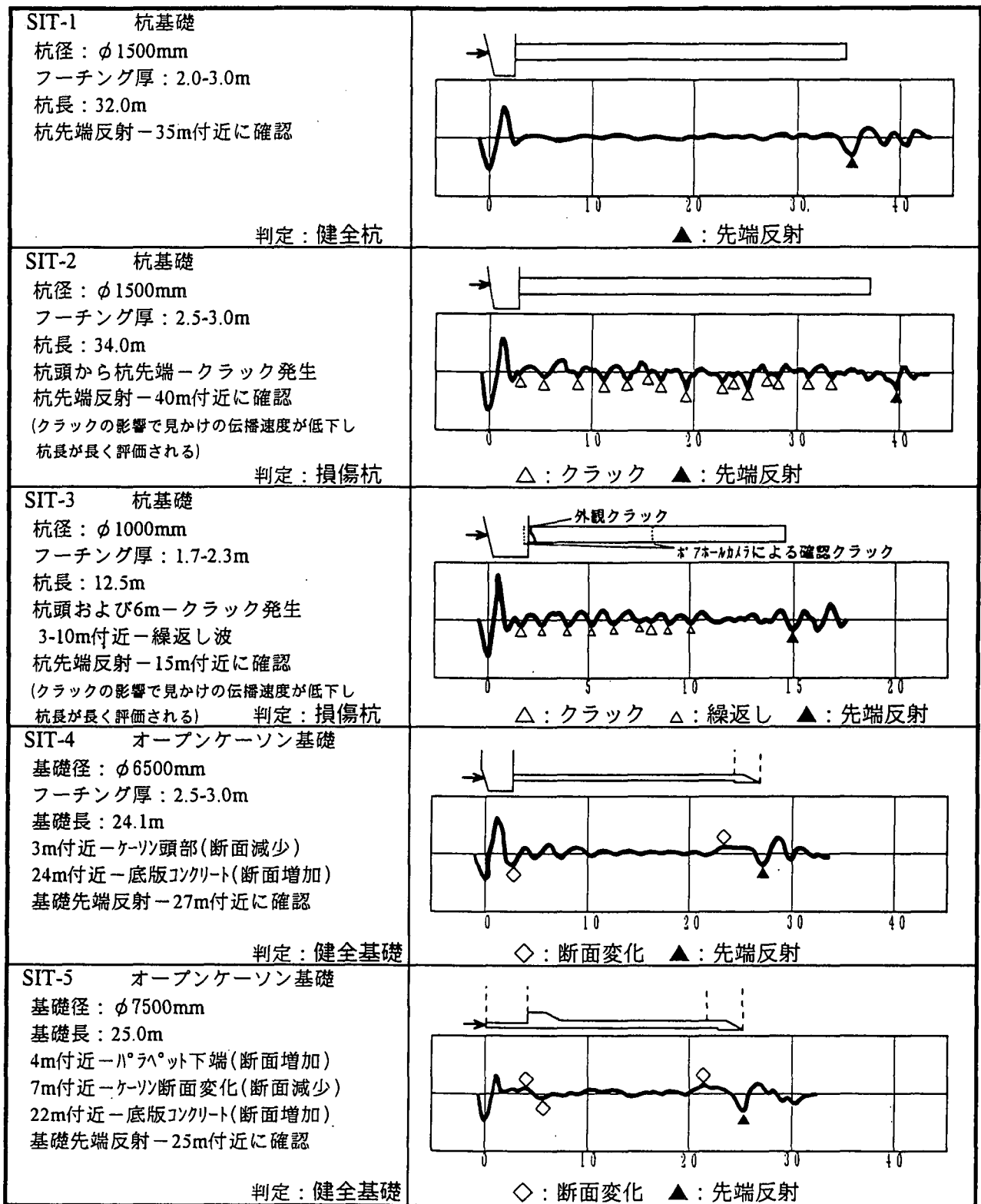


図-5 各基礎構造物における SIT 結果

#### 4. SIT データの処理・加工

SIT の波形処理にあたっては、クラックの発生は断面減少を意味することから、波形上引張波(下向きに凸な波形)に着目した。原波形の処理・加工方法を以下に示すとともに、その方法により基礎杭の損傷程度を確認したものが図-6である。

①SIT によって得られる原波形は時間軸に基づく速度変化波形である。そこで時間軸に伝播速度を乗ずることによって横軸を距離(深度)に換算し、縦軸には損傷等の影響によって発生をする速度変化を表したものが原波形である。

②測定条件によっては波形にフーチングの影響によると考えられる繰返し波が発生することがある。その場合は高速フーリエ変換(以下 FFT と呼ぶ)を行った後に卓越周波数帯を排除して逆 FFT を行うことによって、フーチング等による繰返しの影響波を排除した波形を求める<sup>2)</sup>。(FFT 処理波形)

③波形を入力波の大ききで除することによって波形の規準化を図り、他の杭と同一条件下で比較を行うものとした。(規準化波形)

④損傷位置を明確に判断するために、クラック等の断面減少に伴う波形変化となる引張波(下向き振幅)のみを二乗することによって損傷に伴う波形を強調し、ノイズ等の微細な波形変化は除去する。さらに、この加工段階で測定基準を杭頭に変更する。(片振幅二乗)

⑤反射波の大ききは、深さが増すに従い減衰することから、距離減衰を考慮した振幅の補正を行うことによって深い位置の微小な応答波形を増幅し、損傷波形を明瞭に表示する。(増幅波形)

⑥しかし、クラックが発生することによって弾性波の見かけ上の伝播速度が低下すると考えられることから、クラックの発生本数に伴う速度補正を行い、杭体が発生していると考えられるクラック位置を表示する。ただし、振幅の小さな波形は、コンクリート内部の細かな品質変化や波形ノイズとして処理を行うことによって、1,7,12,14,16m 付近にクラックが発生していることを確認できる。(補正深度波形)

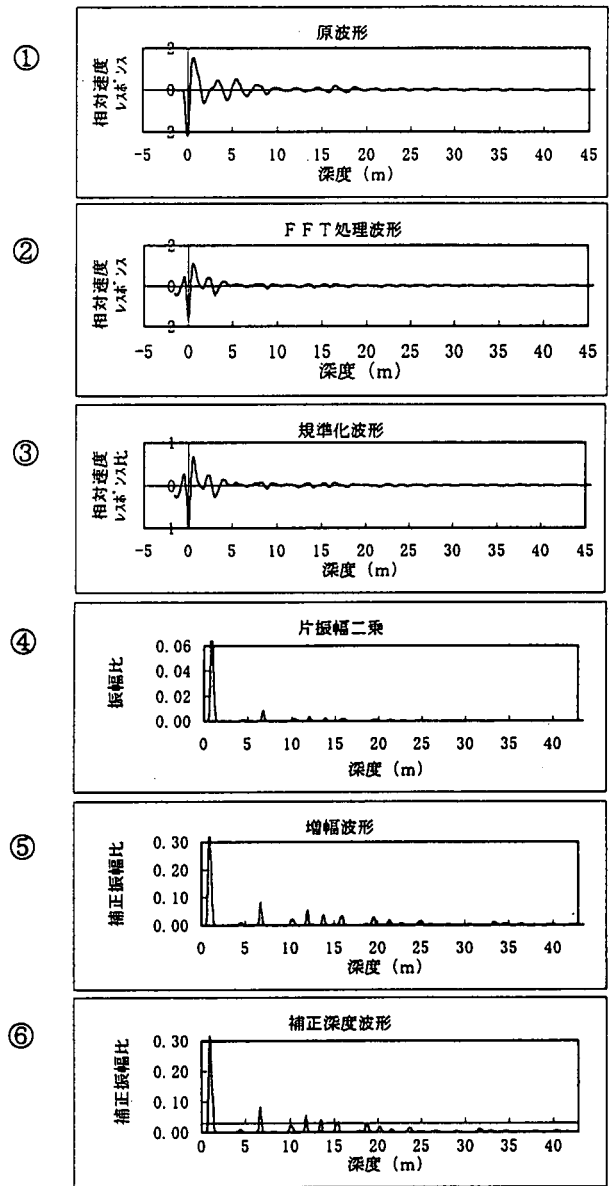


図-6 波形処理・加工例

## 5. ボアホールカメラ調査結果との比較

### 5.1 クラック発生位置の比較

SIT による補正深度波形に基づき推定しているクラック発生状況とボアホールカメラ調査によって確認したクラック(以下確認クラックと呼ぶ)発生状況を比較したものを図-7 に示した。杭頭付近および10m付近については SIT 結果と確認クラックがほぼ一致していることがわかる。しかし、2m および 5m 付近では確認クラックが各々 2 本ずつ発生しているが、SIT では波形ピークが各々 1 本しか確認されておらず、2 本のクラックがまとまった形で波形が発生しているものと考えられる。

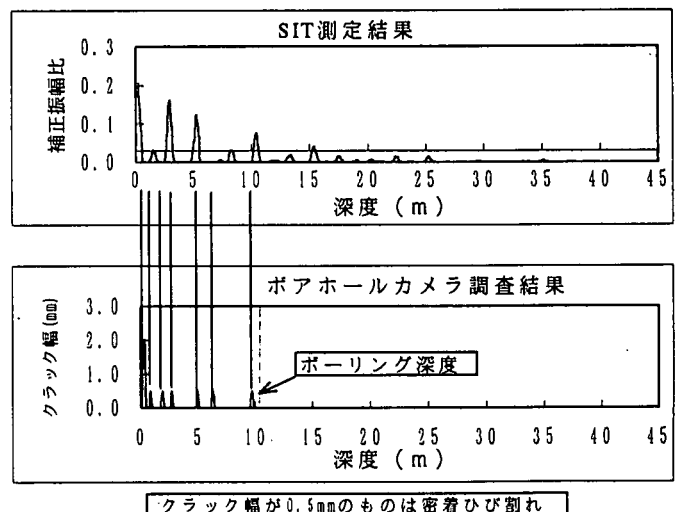


図-7 クラック発生位置比較図

これは、衝撃弾性波をプラスチックハンマーで入力する際の入力波の幅が 0.5m 程度であり、密集したクラックについて全て確認することは困難なためである。

## 5.2 クラック発生本数の評価

SIT では密集したクラックは波形上1つのクラックと判断することや、SIT においては杭周全体に密着クラックが発生していても、基礎杭が荷重を受けているため波形応答として出現しにくい。ため、ポアホールカメラ調査によるクラック本数と SIT によるクラック本数を比較すると後者の方が少なく相関式は式(5)となった。

$$N_s = 0.635 \times N_b \quad (5)$$

ここに  $N_s$  : SIT によるクラック本数(本)

$N_b$  : ポアホールによるクラック本数(本)

相関については図-8 に散布状況を示すように、相関係数は 0.63 であることからばらついてはいるが比較的相関があるといえる。

## 5.3 クラック幅の評価

SIT における波形振幅の大きさと確認クラック幅の関係を示したものが図-9 である。波形振幅の大きさに関係なく、密着クラック(幅 1mm 未満の微小なクラック)から 4mm のクラックまでが存在しており、両者の関連性は見出せない。これは、SIT は主として杭体の断面積の変化によって生じる波形変化を測定することに起因しているためであり、現段階ではクラック幅の評価は難しいものといえる。

一方、ポアホールカメラ調査では、ボーリングを行った1部分のデータをもとにクラックを検出している。したがって、ポアホールカメラ調査にて検出されたクラックは杭体全周に及んでいるとは必ずしもいえない。このため、ポアホールカメラ調査では密着クラックが確認されているのに、SIT の波形振幅が確認することができない場合や、逆に SIT では波形振幅が確認されているがポアホールカメラ調査ではクラックが確認されていない場合も存在することになる。

## 6. SIT による損傷状況確認例

### 6.1 橋脚1基の損傷状況

阪神高速道路5号湾岸線では簡易的かつ迅速に測定が行える SIT を1橋脚につき複数杭に対して実施し、橋脚全体の状況把握を試みた。測定可能な全杭(柱直下の杭を除く)を対象に調査した結果例を、クラック本数を杭長で除したクラック密度として図-10 に示した。全体にクラックが発生していることがわかり、1橋脚内のクラック発生本数の分布に残留水平変位{GPS(汎地球測位システム)測量を用いた地震前後の橋脚水平移動量から地盤の変位量を差し引いた変位量}等との顕著な傾向を確認することができない。そこで、SIT より確認した1橋脚内全杭のクラック密度を平均した平均クラック密度を橋脚の代表値とする。ただし、図-10 に示した橋脚の平均クラック密度は 0.3 本/m 程度であり、杭長が 34m のため杭1本当たり 10 本程度のクラックが発生している結果となる。

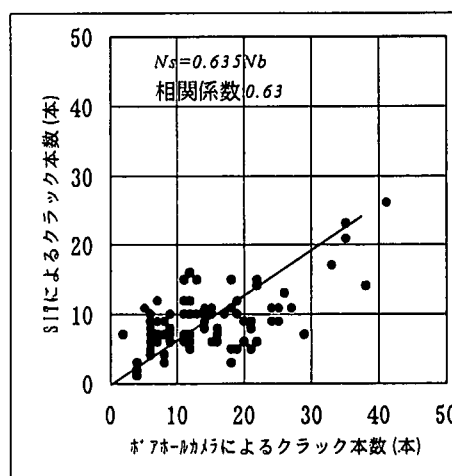


図-8 クラック本数比較図

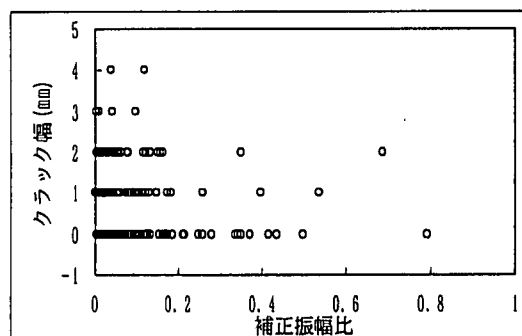


図-9 補正振幅比とクラック幅の関係

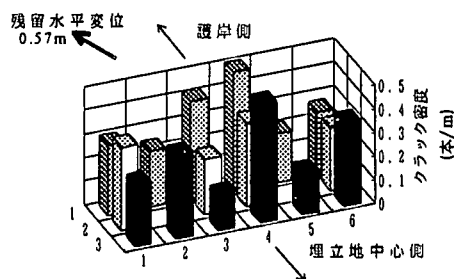


図-10 1橋脚全体のクラック密度

## 6.2 地盤別によるクラック密度

平均クラック密度では、杭全体として評価することから損傷の深度分布を評価することができない。そこで、埋立層と旧地盤におけるクラックの発生状況の違いを把握するために、地盤別のクラック密度を算定し図-11に示した。

埋立層におけるクラック密度の頻度は 0.5 本/m をピークとして幅広く分布しているが、旧地盤におけるクラック密度は 0.1 本/m 以内が大半を占めており、旧地盤内でのクラック密度が低いのに対して、埋立層内のクラック密度が高くなっていることから、埋立層を中心にクラックが発生していることがわかる。

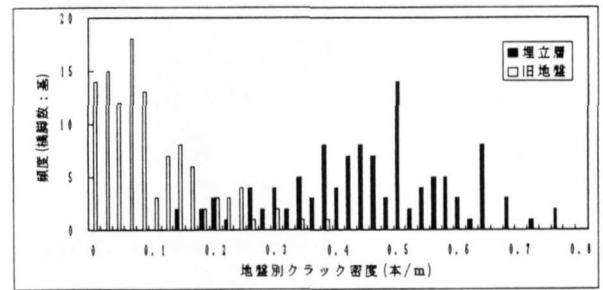
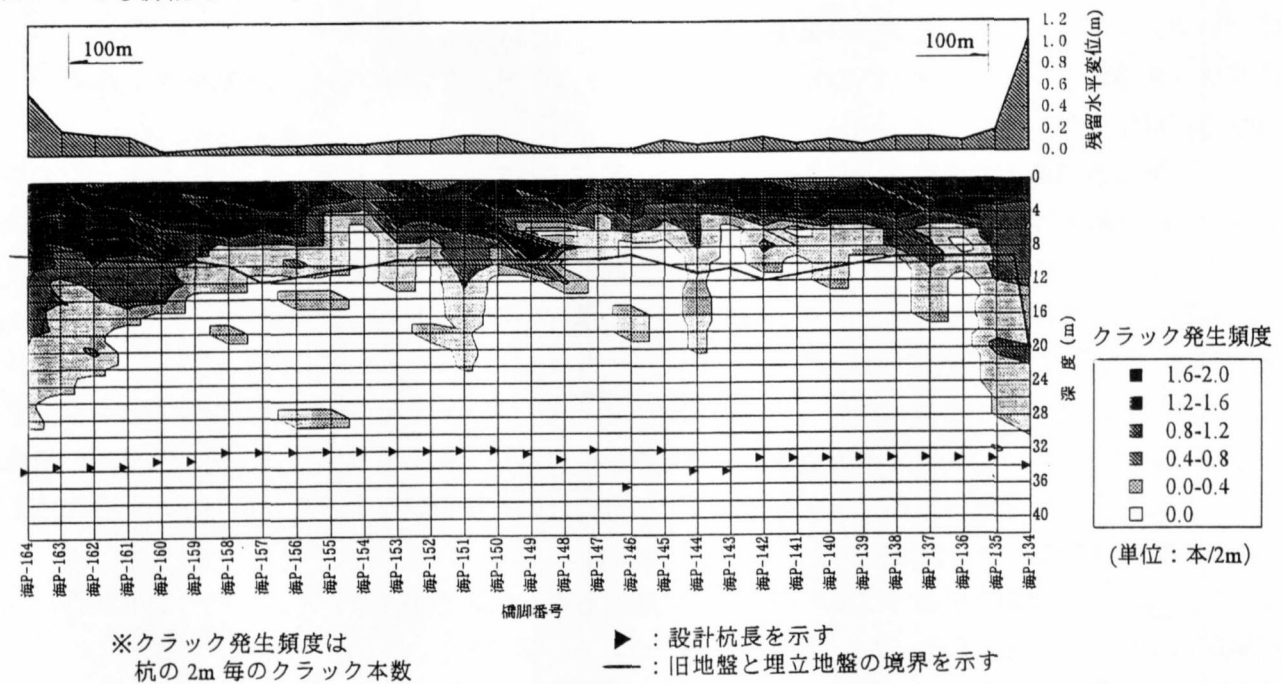


図-11 地盤種別によるクラック発生率の比較図

## 6.3 クラック発生頻度と残留水平変位

次に、深度方向の分布を確認するために、各橋脚の杭長を 2m 毎に分割し、各 2m 毎の平均クラック本数をクラック発生頻度として深度方向の分布を求めた<sup>3)</sup>。埋立地の両端に護岸が存在し、かつ全て杭基礎で施工された橋脚が採用された埋立地のクラック発生頻度の分布を図-12に示した。また、図-12には残留水平変位についても併記している。



※クラック発生頻度は 杭の 2m 毎のクラック本数  
 ▲ : 設計杭長を示す  
 — : 旧地盤と埋立地盤の境界を示す

図-12 クラック発生頻度分布の一例

クラック発生頻度が高い濃色部はほとんど埋立層内に分布しており、旧地盤内にクラックがあまり発生していないことがわかる。ただし、護岸付近についてはクラック発生深度が杭頭から 30m 付近まで達しており中間部以深にもクラックが発生しているものと考えられる。

残留水平変位とクラック発生頻度分布を比較すると、残留水平変位が非常に大きい護岸脇の橋脚では深い位置にまでクラックが発生している状況を確認することができる。

基礎杭の残留水平変位が大きく護岸より 100m 以内に位置する各 2 橋脚については、杭体全域にクラックの発生が確認できる。

## 6.4 基礎の大きさと杭損傷の関係

GPS 測量から基礎に残留水平変位が確認されていることから、杭単位の損傷ではなく、基礎全体として損傷が発生しているものと考えられる。そこで、基礎の大きさ(杭本数)とクラック発生状況の関係を求めたものが図-13である<sup>4)</sup>。

各橋脚の杭本数と平均クラック密度の分布をみると、平均クラック密度の大きい橋脚は杭本数が少ないことがわかる。また、杭本数が多い橋脚については比較的 average クラック密度が小さくなっていることがわかる。

図中の●が本線橋脚、○がランプ橋脚である。全体的に、ランプ橋脚はクラック発生率が高く、本線橋脚は比較的クラック発生率が低い傾向がある。これは、ランプ橋脚は一般的に杭本数が少ないことに起因していると考えられる。ただし、ランプ橋脚の中でも杭本数が比較的多い橋脚は平均クラック密度が小さく、クラック発生率が比較的低いことがわかる。

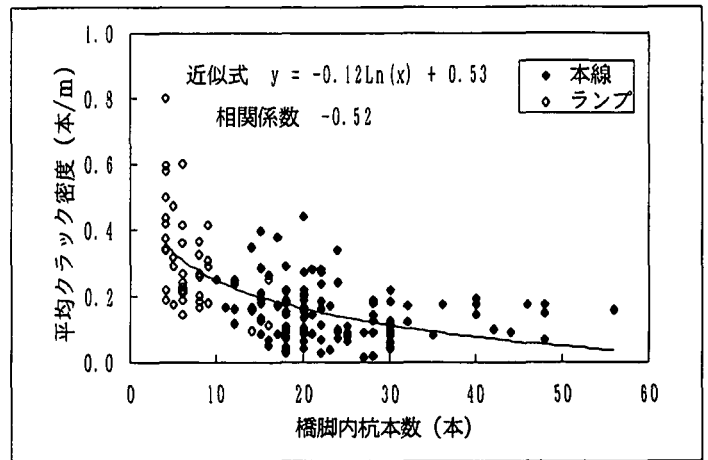


図-13 杭本数と基礎の大きさの関係

## 7. まとめ

兵庫県南部地震によって被災した阪神高速道路5号湾岸線の基礎杭における損傷調査方法として、SITを適用した結果についてまとめると下記の通りである。

- ①フーチング上面からでも基礎杭の損傷を推定することが可能となった。
- ②クラックの大きさ(幅)については現段階では評価できないが、クラックの発生本数や発生頻度については推定が可能である。

また、阪神高速道路5号湾岸線における基礎杭をSITによって評価した結果、埋立地の護岸付近の橋脚基礎については流動化の影響で残留水平変位が大きく、深い位置でのクラックが確認できるが、埋立地の中央付近の橋脚基礎についてはクラックが埋立層内に限られており、旧地盤内ではほとんど確認されなかった。また、基礎の大きさが小さければクラック発生率が高い傾向がみられた。

## 8. あとがき

SITは本来、品質管理のために開発された測定システムであり、杭体の形状(拡底杭や杭長等)を調査し、設計段階で要求されている品質を確認する手法である。この手法を初めて地震により被災した杭の損傷評価に適用した結果、特殊な波形処理を施すことによって杭の評価方法を確立することができた。これにより、SITによる損傷調査の精度が大幅に向上することとなった。

ただし、現時点ではSIT単独では損傷の全容を評価することに限界があるため、目的や立地条件あるいは工期等を踏まえてその他の調査手法を併用していくことが必要である。

また、SITは短時間に多くのデータを収集して、杭単体のみならず橋脚単位あるいは埋立地盤単位の損傷評価が可能な手法であることから、2次的な詳細調査に先立ち行われる全体的な損傷状況の把握調査に適する手法であるといえる。

## 参考文献

- 1)南荘, 杵本, 今田, 仲田; 埋土地盤における基礎杭の健全性調査手法について, 第31回地盤工学研究発表会講演概要集, p1791~p1792, 地盤工学会, 1996.7
- 2)仲田, 南荘, 川上, 今田; フーチング上面からの基礎杭非破壊調査手法について, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, p716~P717, 土木学会, 1996.9
- 3)南荘, 足立, 阪神高速道路における基礎杭の損傷調査, 橋梁と基礎, Vol.30, No.8, p51~p63, 建設図書, 1996.8
- 4)仲田, 南荘, 安田, 今田; 非破壊試験に基づく埋土地盤における基礎杭の被災特性, 第32回地盤工学研究発表会講演概要集, 地盤工学会, 1997.7 発表予定