

非破壊試験による基礎杭損傷調査における 解析手法の開発と適用性に関する研究

松井 保¹・南荘 淳²・安田扶律³・仲田慶正⁴・今田和夫⁵

¹フェロー 工博 大阪大学 工学部 土木工学科 教授 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

²正会員 阪神高速道路公団 工務部 設計課 調査役 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 大阪センタービル内)

³正会員 阪神高速道路公団 工務部 工務第一課 係長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 大阪センタービル内)

⁴正会員 株式会社 フジエンジニアリング 調査設計部 調査一課 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 4-13-3)

⁵正会員 株式会社 フジエンジニアリング 調査設計部 第一部長 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 4-13-3)

兵庫県南部地震により被災した阪神高速道路の基礎杭損傷調査に衝撃弾性波を用いた非破壊試験(略称 SIT)を初めて適用した。適用にあたり、フーチングや杭頭損傷に伴う繰返し反射波等の影響を除去できる波形処理解析手法を開発するとともに、解析結果と目視結果を比較検討することにより、その適用性を検証した。さらに、埋立地の基礎杭損傷調査への適用結果から、地盤あるいは基礎の変位と杭の損傷との相関性を明らかにした。

Key Words : nondestructive test, foundation pile, crack, earthquake damage

1. はじめに

兵庫県南部地震の影響により、神戸市を中心として多くの土木構造物が壊滅的な被害を受けた。阪神高速道路においても図-1に示すように、3号神戸線あるいは5号湾岸線で、一部高架橋の倒壊、橋脚の座屈、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、阪神高速道路公団において、被害や損傷の実態把握のために、いち早く緊急点検や調査を実施し、その結果を補強対策に反映してきた。

橋梁構造物のうち橋脚など地上に位置する構造物は、被災状況を目視によって直接確認できるのに対し、地中部の基礎構造物の損傷は地盤掘削を行わない限り直接目

に触れることがない。特に杭基礎の場合は、杭体が地盤深部に及ぶため、杭全体の損傷状況を直接確認することは非常に困難である。

埋立地を通る阪神高速道路 5号湾岸線では、地震に伴う地盤の液状化・側方流動による橋脚の水平変位が観測されていることから、地中部における基礎構造物の損傷の可能性が予測された。したがって、基礎構造物の被災状況の確認が急務であったので、①杭側面を掘削し杭頭を目視確認する方法(直接目視)、②杭体内を削孔しテレビカメラを挿入するボアホールカメラ調査(間接目視)、③衝撃弾性波を用いた非破壊試験の3手法を用いて基礎構造物の調査を行った¹⁾。

本論文では、迅速性および経済性に優れた非破壊試

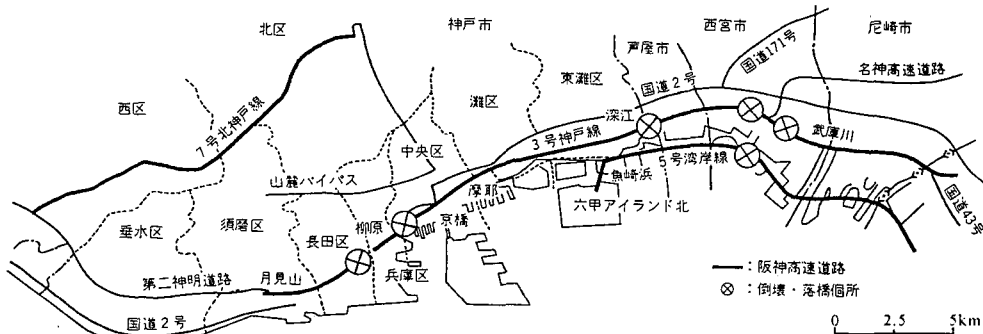


図-1 3号神戸線および5号湾岸線の位置図

験を実際の既設杭基礎の被災状況調査へ初めて適用した。その結果に基づいて具体的な波形解析手法の開発やその適用性について種々の検討を加えるとともに、適用事例として阪神高速道路5号湾岸線における地盤あるいは橋脚変位と非破壊試験結果により得られた場所打ち杭基礎を対象とした損傷との関係について考察した。

2. 既存の基礎杭損傷調査法と概要

既存の基礎杭損傷調査法として直接目視法、間接目視法(ボアホールカメラ調査)、非破壊調査として衝撃弾性波法、速度検層法²⁾、電磁波レーダー法²⁾、AE(アコースティックエミッション)法³⁾、動的載荷試験法⁴⁾等が挙げられる。その非破壊調査の中で、速度検層法は間接目視調査法と同様に杭体中をボーリング削孔する必要があり、間接目視調査法と同程度の工期を要する。また、電磁波レーダー法およびAE法は周辺地盤にボーリング孔を必要とし、フーチング中央付近では杭の損傷判定は困難と考えられる。さらに、動的載荷試験法のように杭耐力を確認することも重要であるが、非破壊調査としては、まず迅速に場所打ち杭基礎全体の損傷を確認する必要がある。そこで、非破壊調査手法として、迅速性、経済性に優れた衝撃弾性波法を選定し損傷の全体把握を行うことにした。

したがって、阪神高速道路における地震による場所打ち杭基礎の損傷調査として、実績、迅速性および測定精度を考慮して直接目視法、間接目視法、衝撃弾性波法を採用した。以下にこの3調査法の概要を示す。

(1) 直接目視法

直接目視法は、基礎杭の側面を掘削し、杭表面に発生したクラック等の損傷を直接目視によって確認する方法である。この方法は杭体外周面に発生しているクラックの発生位置やクラック幅が確認でき、損傷状況を最も正確に把握できる。しかし、フーチング下面からさらに掘り下げが必要となることから、確認範囲が杭頭付近に限られる。また、掘削に伴い写真-1に示すように土留め支保工や止水工が必要となり費用が膨大となることから、多くの基礎を対象とすることができない。

(2) 間接目視法(ボアホールカメラ調査)

間接目視法については、岩盤調査における地層面や節理面の走向傾斜や亀裂の開口幅などを確認することを目的として開発されたシステム⁵⁾を用いた。この方法はコンクリート杭体中に設けたφ66mmのボーリング孔内にテレビカメラを挿入し、撮影した映像をコンピュータで画像処理することによりボーリング孔壁面の展開図として表し、クラックの発生位置や大きさを間接的に確認す

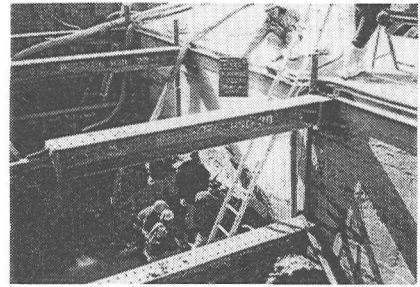


写真-1 杭頭目視に伴う掘削状況

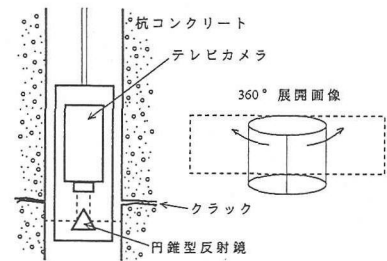


図-2 ボアホールカメラ調査概要

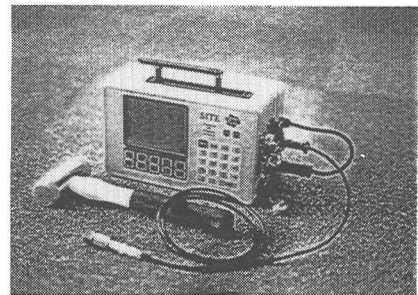


写真-2 SIT使用測定器

るものである(図-2参照)。

杭体中にボーリングが可能であれば比較的深い深度までクラックの発生状況を確認することができる。ただし、ボーリング削孔に時間と費用がかかり、短期間にあまり多くの杭を調査することはできない。クラック幅については、ボーリング削孔に伴うクラックの角落ち等により大きく判定される場合もあった⁶⁾。

(3) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波による非破壊試験(Sonic Integrity Test: 略称SIT)は杭の品質管理のために開発されたシステム⁷⁾であり、杭頭から衝撃波を入力し、断面変化位置および杭先端で発生する反射波により杭の形状と品質確認を行うものである。その測定器の一例を写真-2に示す。

SITは迅速性および経済性に優れており、短期間に多くの杭を対象に調査を行うことが可能である。しかし、SITは伝播する衝撃波の速度変化に基づいて杭損傷状況を評価するものであり、クラックを目視確認できないた

め、測定精度は直接および間接目視法と比較するとやや劣るものと考えられる。また、SIT は地震の影響による杭の損傷調査に用いられた例がなく、杭の品質管理に用いられる通常の場合のように杭頭部からの測定とは異なり、今回はフーチング上面からの測定であったため、適用性の検討が必要である。

直接および間接目視法については、クラックの発生位置の正確な深度が確認できる。しかし、SIT については、反射波到達時間に衝撃波の伝播速度を乗じることにより深度を推定するため、その推定精度を向上させるには目視により確認したクラック発生深度との整合を図って、伝播速度を正確に推定することが必要である。

3. SIT における測定原理と方法

まず、SIT の一般的な測定原理と方法について概説する⁷⁾とともに、杭の損傷調査への適用性について検討する。

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、杭中での波動は式(1)の波動方程式で表すことができる。

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

ここに、 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あり、 $c = \sqrt{E/\rho}$ (E は杭の弾性係数、 ρ は杭体密度)で表される。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)の特解の一つは式(2)で示される。

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

ここに、 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)を示すものである。

図-3 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。断面変化点に波動が達すると一部は透過波(TF)として更に進行し、他は反射して後退波(RF)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)は式(3)で与えられる。

$$T_a = \frac{2Z_a}{Z_a + Z_b}, \quad R_a = \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (3)$$

ここに、 Z_a 、 Z_b は各々断面変化点の上下における杭のイ

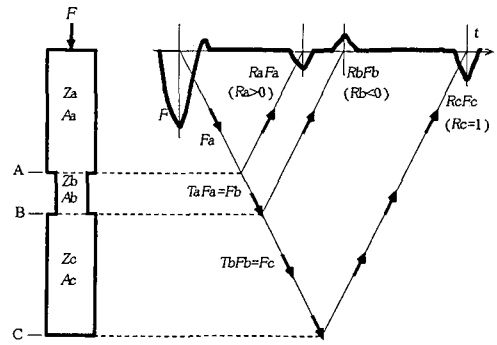


図-3 断面変化に伴う波形変化

ンピーダンスであり、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 によって式(4)のように示される。

$$T_a = \frac{2A_a}{A_a + A_b}, \quad R_a = \frac{A_a - A_b}{A_a + A_b} \quad (4)$$

すなわち、断面変化点 A では、 $A_a > A_b$ であることから $R > 0$ となり、反射波($R_a F_a$)は入力波(F)と同符号となる。一方、断面変化点 B では、 $A_b < A_c$ であることから $R < 0$ となり、反射波($R_b F_b$)は入力波(F)と逆符号となることがわかる。

一方、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、クラック発生部では入力波(F)と同符号の反射波($R_a F_a$)が出現することになる。ここで、クラックとはその幅に関係なく杭の断面減少を伴う損傷を示し、部分的なものについても含まれている。また、杭先端部 C では自由端と考えられるため、入力波(F)と同符号の反射波($R_c F_c$)が発生することになる。

これらの反射波を加速度計により測定し、1 回微分して速度波形に変換することで、上述した反射波の符号に基づく杭体状況の推定が可能となる。つまり、入力波と同符号の反射波は、杭先端での反射波以外は断面減少に伴う変化であることから、杭体に発生したクラックによるものと考えられる。ただし、比較的明瞭なクラックによって発生した反射波については、測定面とクラックで重複反射することによって繰返し反射波が発生する場合がある。また、顕著な損傷(杭体破断)が発生していると、損傷部に深に波動が伝播せず、その部分で重複反射(全反射)することによる繰返し反射波(正弦波)が出現し、それ以深の状況が確認できなくなる。さらに、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の影響を受けられるものと考えられる。ただし、地盤拘束の影響については現時点では定量的評価が難しく、今後の検討課題としたい。また、RC 杭では段落し

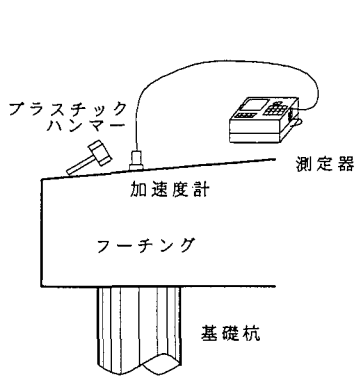


図4 フーチングを有する基礎杭の損傷調査におけるSIT測定方法

部で鉄筋量に変化するが、鉄筋比そのものが0.3%程度であるので、今回の調査では段落しの影響は小さいと考えて、無視することとした。そのため、杭体の品質は一定として伝播速度は過去の実績より得たRC杭の平均的な値である4000m/sを用いて分析を行った。

4. フーチングを有する基礎杭の損傷調査へのSITの適用性

(1) 概説

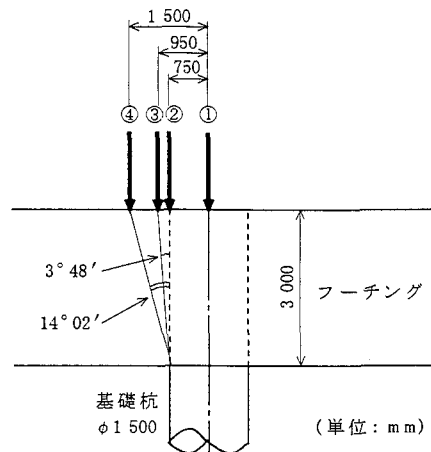
新設杭打設時の品質管理として用いる場合のSITは杭頭からの測定が可能のため、前章の理論に基づき杭体状況の評価を行うことができる。しかし、今回対象とした既設基礎杭の損傷調査はフーチングが存在していることから、測定方法の検討および適用性を確認することが必要である。

本来SITは、杭頭部にセンサーを密着させ、その近傍(10cm程度離れた位置)を小型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、既設の場所打ち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。そのため、図-4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SIT測定が行われる。ただし、フーチング上面からSIT測定を行った実績がほとんどないことから、以下では調査限界について検討する。

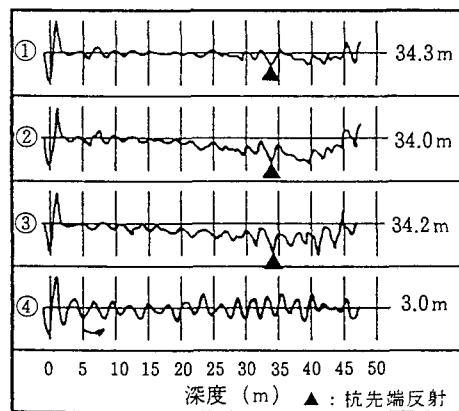
(2) 測定位置の検討

フーチング上面からSIT測定を行う場合は、設計図に基づき、杭の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-5に示したように、フーチング上面の加速度計設置位置を①～④まで移動させて測定した各々



SIT測定波形



縦軸：相対速度レスポンス

図-5 SIT測定波形と測定限界角

の応答波形は横軸を深度、縦軸を入力速度に対する各深度の振動速度の比率(以下相対速度レスポンスと呼ぶ)として得られ、その応答波形より杭先端反射を確認することができる測定限界角が求められる。すなわち、加速度計が杭直上となる①と②における波形を見ると、杭先端反射を34m付近(▲印)に確認することができ、杭先端まで衝撃波が伝播していると評価できる。しかし、④のように杭芯から1.5m(杭端から0.75m)離れた位置に加速度計を設置すると、波形はほぼ3mピッチの繰返し反射波が顕著であるので、杭体に衝撃波が入力されていないものと考えられる。一方、③は杭芯から0.95m(杭端から0.2m)離れた位置に加速度計を設置しており、フーチング下面の繰返し反射波が発生しているものの、明瞭ではないが杭先端反射も確認できる。また、打撃による衝撃波の大きさと加速度計の位置関係は、構造物の大きさに比例して測定には大きな衝撃波が必要となることから、加速度計の作動範囲により決定される。すなわち、

今回のように杭長が大きくフーチングを介して測定する場合は、大きな衝撃波を入力するため、加速度計設置位置と打撃位置間の距離は通常の品質管理における10cm程度よりも大きくとり30cm程度とした。

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°48′)離れた位置であれば杭体全体に衝撃波を入力できるが、杭端部より0.75m(14°02′)離れるとフーチングの影響が顕著となり杭体の応答を確認することができないことが判る。したがって、フーチング上面ではフーチング厚に対し少なくとも4°程度以内の範囲であれば杭体の損傷調査は可能であることが確認できる。

また、今回の基礎杭損傷調査においては、杭の施工誤差を最大限見積もっても杭施工位置が設計図と杭径(φ1.5m)の50%以上ずれることは現実的に考えられず、設計図の杭芯で調査を行うことにより杭体の応答波形を得ることができると考えられるので、原則として設計図の杭芯においてSIT測定を行っている。

(3) 原波形による杭損傷の評価

a) 原波形による判定法

杭直上のフーチング上面からSIT測定を行った典型的な応答波形を図-6および図-7に示す。図-6において、入力波と同符号の反射波が杭先端位置で明瞭に確認することができ、フーチング厚を含むと設計杭長通り35m程度の健全な杭と判定できる。また、この杭については波形の上方に示す杭模式図の破線までポアホールカメラ調査を実施し、損傷がないことが確認されている。

しかし、図-7に示した波形において、入力波および杭先端反射と考えられる反射波以外に杭全体に波形が変化していることがわかる。また、波形上方の杭模式図に示すポアホールカメラ調査においても杭全体にクラックが発生していることを確認していることから、図-7に示すような波形の変化が確認できる杭は損傷発生杭と判定できる。

一方、杭体に損傷が発生している杭では、ポアホールカメラ調査と比較してSITではクラック発生位置が少し深く現れ、杭長についても少し長く示される傾向が認められる。この点については以下に再び検討される。

b) 原波形による判定法の問題点

上述したように、図-6と図-7を比較することにより健全杭と損傷杭の判別ができる。しかし、杭全体に軽微なクラックが発生している杭についても、図-7のような波形変化が現れる。たとえば、図-8に示すように、ポアホールカメラ調査結果より杭頭の方に明瞭なクラックが発生し、その損傷が深については損傷が確認されていない杭の波形には規則性の高い波形(波の周期を長さで表すと約2.4m)が現われる。この原波形のみから判定

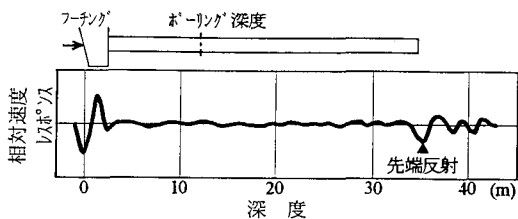


図-6 健全杭と判定できるSIT波形

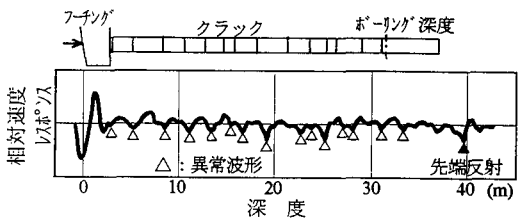


図-7 損傷杭と判定できるSIT波形

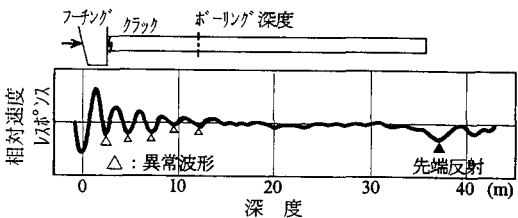


図-8 杭頭に明確な損傷が発生しているSIT波形

すると、約2.4mピッチにクラックが発生しているのか、約2.4mの位置での損傷による重複反射によるものなのかの評価は困難である。したがって、損傷による波形変化と繰返し反射による波形変化を判別することが必要となる。

また、SITは杭体の伝播速度を均一に設定して測定を実施しているため、健全な部分と損傷発生部の伝播速度を同一として深度方向の評価を行っている。しかし、杭体にクラックが発生することによって杭の見掛けの波動伝播速度が低下することが、図-7および図-8の測定結果から類推できる。しかも、クラックの発生本数に伴いSITにより推定できるクラック発生深度が、実際に発生しているクラック発生深度より少し深く評価される傾向が認められる。

これらの結果より、SITにより得られる原波形から、健全杭か損傷杭かの大まかな判定はできる。しかし、クラックの発生状況や発生深度等については、その評価に技術的判断を必要とすることから、技術的判断を判り易く表示する手法が望まれた。

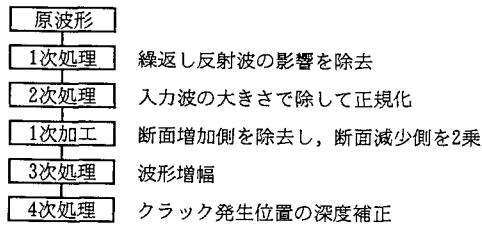


図-9 波形処理解析のフロー図

5. SIT による基礎杭損傷調査における解析手法の開発

(1) 概説

前項で述べたように、原波形による判定法には種々の問題点があり、そのままでは杭体の損傷状況が実用上評価できない。そこで、原波形に適切な波形処理を施し、繰返し反射波を除去するとともに、クラックによる波動伝播速度の減衰を考慮して、クラック発生深度を補正する解析手法を開発する。

SIT により得られたデータから、クラックの発生位置を正確に把握するために、図-9 に示すフロー図に従って4段階の波形処理と1段階の波形加工からなる解析手法を提案する。その具体的手法を以下に述べる。ただし、提案する波形処理解析手法によって得られたデータの精度については、ボアホールカメラ調査結果に基づいて検証する。

(2) 波形処理解析手法

a) 繰返し反射波の処理

フーチング上面からの SIT 測定であることから、フーチングの影響が波形全体に及ぼすものと考えられる。しかし、杭直上で測定を行う場合については、フーチングの影響がほとんど原波形には含まれないことが図-5 より確認できる。しかし、地震による損傷が最も発生しやすい杭頭部に顕著な損傷が発生している場合には、前述したようにその繰返し反射の影響により損傷以深の状況を正確に確認できない場合がある。

この繰返し反射の影響を除去するために、筆者らは原波形を高速フーリエ変換(以下 FFT と略す)した後、卓越する周波数帯を除去する手法を提案する。すなわち、図-10①に示すように、約 2.2m 間隔の繰返し反射波(△印)が発生している原波形を FFT 処理することによって、図-10③に示したフーリエスペクトル曲線が得られる。杭頭付近の損傷の影響による繰返し反射波の波長は約 2.2m であることから、RC 杭の伝播速度を過去の実績に基づき 4000m/s と仮定すると、卓越周波数は 900Hz 程度となる。そこで、杭頭損傷の繰返し反射波によるも

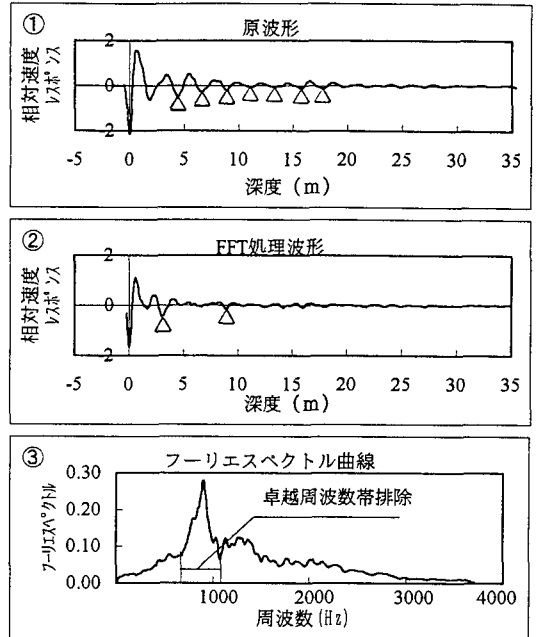


図-10 繰返し反射の影響除去手法の説明図

のと考えられる図-10③に示すような明らかに卓越した周波数を含む範囲(範囲設定→周波数帯の除去→逆フーリエ変換の作業を繰り返すことにより設定される周波数の範囲)を除去し、繰返し反射の影響を除去した波形が図-10②の FFT 処理波形となる。杭頭付近に発生した損傷の影響による繰返し反射波が除去され、杭頭損傷以深の損傷発生状況(△印)を確認することが可能となる。

b) 波形の正規化

SIT は入力によるハンマリングによって衝撃波を杭体に入力するため、入力波の大きさにばらつきが発生する。そこで、入力波の大きさが異なると反射波の大きさについても差異が発生するため、FFT 処理波形全体を入力波の大きさに除することによって波形を正規化する必要がある。ただし、この波形の正規化は一般に杭の品質管理として用いられている SIT 測定器の測定プログラム自体にその機能が組み込まれているが、測定時の原波形では数値的に処理されていない。

c) 損傷波形の抽出

衝撃波は杭体内を往復する間に減衰し、速度変化を示す波形の振幅が非常に小さくなる。また、FFT 処理により繰返し反射の影響は除去されるが、原波形から損傷を評価する場合と同様に波形判定が簡便になった訳ではない。

そこで、クラック等による杭の断面減少に伴う反射波は入力波と同符号となることから、入力波と同符号の反射波に着目して損傷によるものと考えられる反射波を抽出する方法を採用する。また、損傷に伴う波形と細かな

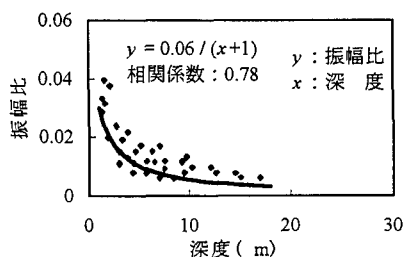


図-11 距離減衰に伴う補正係数算定図

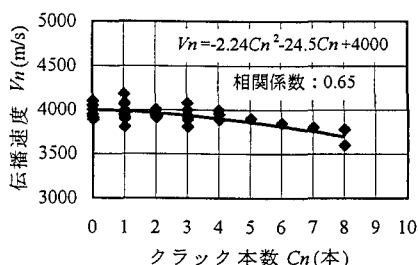


図-12 クラック本数と見かけの伝播速度の関係図

材質変化等によって発生する波形ノイズを分離するため、各データを2乗することで損傷による波形を強調する。これらの処理により、技術的判断を必要とせず損傷判定を行うための片振幅2乗波形を得ることができる。

d) 波形増幅

前述したように、測定深度が深くなるに従って波形が減衰する。また、阪神高速道路5号湾岸線における基礎杭の測定結果による波形の減衰状況は図-11に示す減衰曲線（双曲線）で近似することができる。そこで、この減衰曲線の逆数を片振幅2乗波形に乗じて得られる式(5)により、深度による波形減衰の影響が相殺できる。

$$hx = k \cdot ho \cdot (Lx + 1) \quad (5)$$

ここに、 hx ：距離 Lx における増幅後の振幅

ho ：距離 Lx における増幅前の振幅

Lx ：杭頭からの距離

k ：図-11より得た係数の逆数 (1/0.06)

e) クラック発生位置の深度補正

原波形ではクラックの発生本数によって見かけ上の伝播速度が低減されることが考慮されていない。そのため、前述したようにSITによって推定できるクラック位置がボアホールカメラ調査によって確認したクラック発生位置よりも少し深く現れるものと考えられる。

そこで、クラック発生本数、特に「何本目のクラックか」ということに着目してSITとボアホールカメラ調査によるクラック確認位置から見かけの伝播速度を算定し、クラック本数と見かけ上の伝播速度の関係を求めたものを図-12に示す。

クラック本数と見かけの伝播速度との相関式は式(6)に示す2次曲線となる。

$$Vn = -2.24(Cn)^2 - 24.5Cn + 4000 \quad (6)$$

ここに、 Vn ：対象クラックまでの見かけの伝播速度 (m/s)

Cn ：対象クラックまでのクラック本数(本)

式(6)に基づいて、クラックの発生本数に伴う波動伝播速度の低減を考慮することによって、基礎杭のクラック発生位置の深度補正を行うことができる。

6. SITの波形処理解析手法の検証

(1) 波形処理過程

原波形による損傷判定において問題となる繰返し反射の影響とクラック本数に伴うクラック発生位置の深度のずれを補正する過程を、阪神高速道路5号湾岸線の一例として、図-13の①～⑥に示す。すなわち、

①原波形では、測定面より2m付近に入力波と同符号の反射波が発生し、また、4.5m付近に深に約2.2mピッチに入力波と同符号の反射波(△印)が発生し、見かけ上杭体全体にわたって損傷が発生した杭と判定される。

②原波形より見かけ上損傷と判定できる波形がほぼ等間隔に発生していることから、繰返し反射波が発生していると思われる。そこで、波形①の繰返し成分を除去して得られるFFT処理波形より、測定面から3m付近に入力波と同符号の波形(△印)が確認でき、この深度に損傷が発生していると考えられる。

③正規化波形は入力波の大きさが異なるため、入力波の大きさを波形全体を除いたものである。9m付近においても損傷が発生していると考えられる。

④片振幅2乗波形は正規化波形の断面増加に伴う入力波と逆符号の波を除去し、断面減少による入力波と同符号の波を2乗することによって強調したものである。ただし、③までは測定面(フーチング上面)を基準として表示しているが、④からはフーチング厚を差し引くことにより杭頭を基準として表示している。

⑤増幅波形は測定深度に伴う波形減衰を相殺し、深い位置に発生した反射波を明確にするものであり、補正振幅比が0.5未満はノイズ等の影響が含まれているものとし、0.5以上を(▽印)損傷と判断するものとした。

⑥補正深度波形はクラックの発生本数に伴って見かけの伝播速度を低減し、より正確にクラック発生位置を求めたものであり、図-13⑤より若干クラック発生深度が浅くなり、この深度(▽印)にクラックが発生している

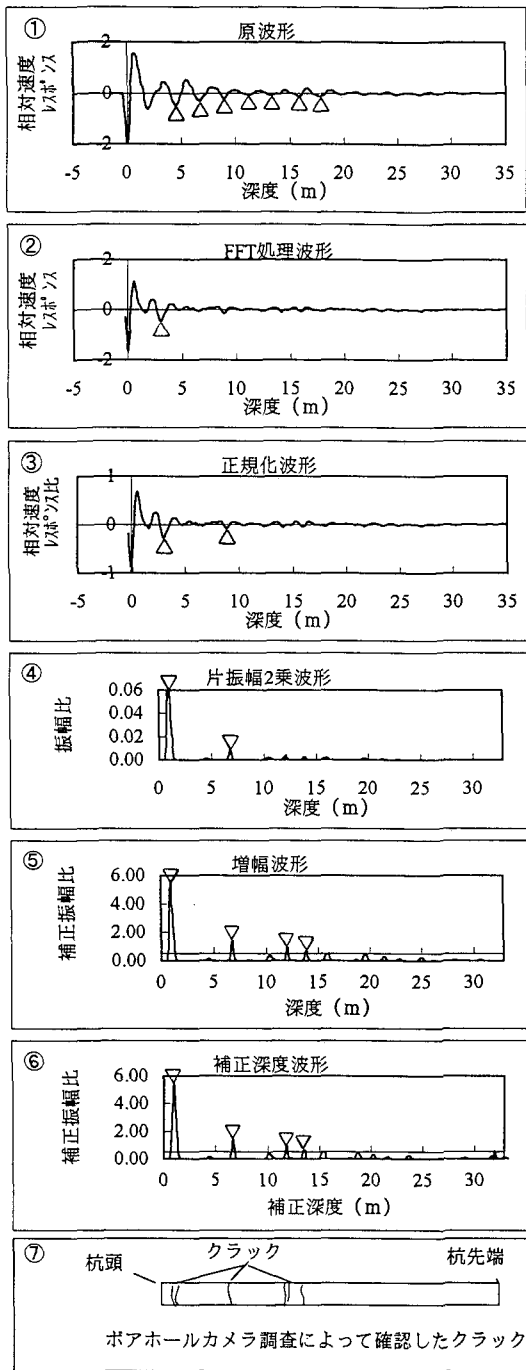


図-13 波形処理過程一覧図

ものと判定できる。

⑦補正振幅比が 0.5 以上を損傷と判定したクラック発生位置(図-13⑥)とポアホールカメラ調査によるクラック発生位置がほぼ一致していることが判る。

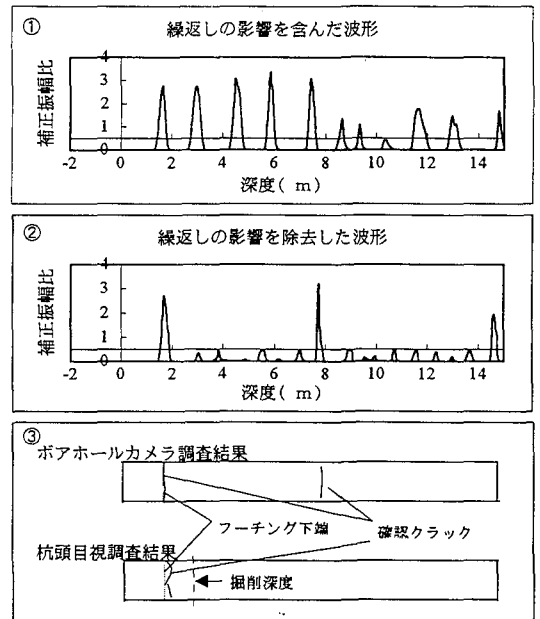


図-14 クラック発生位置検証結果図

(2) SIT データによる解析結果と目視結果との比較

ここでは、SIT データに基づいて解析されたクラック発生位置と直接および間接目視によって確認したクラック発生位置の比較を行うことによって、前章に示した SIT データに基づく波形処理解析手法の検証を他の橋脚基礎における被災例により行う。

図-14 は阪神高速道路 3 号神戸線において杭先端までポアホールカメラ調査によって損傷程度を確認し、杭頭付近は直接目視を実施した結果である。SIT データについては、原波形を FFT 処理および深度補正を実施せずに波形の加工(入力波と同符号の反射波のみを 2 乗)と波形増幅を行った結果が図-14①であり、1.8m 間隔程度の繰返し反射波が発生していることが確認できる。一方、提案する波形処理解析手法による結果が図-14②である。この図よりクラックと判定できる深度はフーチング上面より 1.8m および 7.9m であり、杭先端反射波発生深度は 14.6m 付近に現れている。

また、図-14③には、ポアホールカメラ調査結果および杭頭目視調査結果を図示しており、ポアホールカメラ調査ではフーチング上面から 1.8m および 7.9m 付近、杭頭目視調査では杭頭付近にクラックが発生していることが確認される。以上の結果より、クラック発生位置に関して SIT データによる解析結果と目視結果がほぼ一致することが確認できた。したがって、基礎杭の損傷調査についてはフーチング上面から SIT を実施し、提案した波形処理解析手法を用いることによって、クラックの発生位置を同定できることが確認できる。

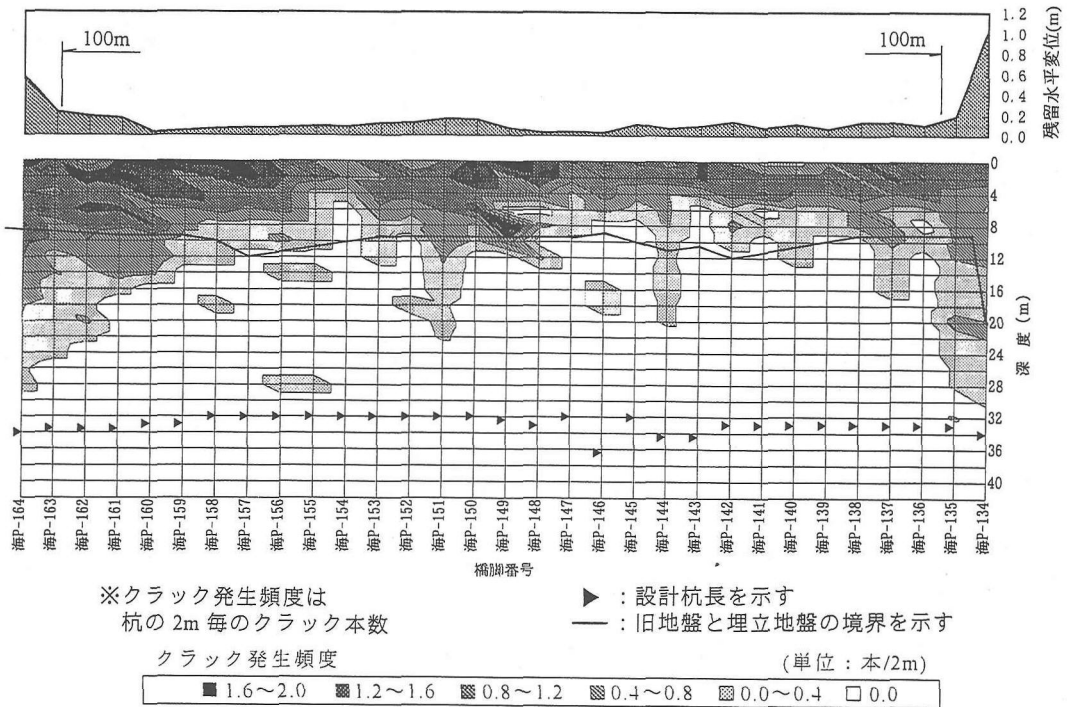


図-15 クラック発生頻度分布の一例

7. 適用事例

前章までは、SIT が既設のフーチング上面から測定可能であることを確認し、地震の影響による基礎杭の損傷調査に適用できることを検証した。以下に、SIT により阪神高速道路5号湾岸線において基礎杭の損傷評価をお行った事例について述べる。

SIT による基礎杭の損傷評価については、各橋脚において複数本数の測定を実施しているため、これら全ての結果が評価の対象となる。そこで、1橋脚内において SIT を実施した各杭のクラック発生本数を深度方向に 2m 毎に求め、それらを各深度毎に合計し、対象杭本数で除すことによって、各 2m 毎の平均クラック本数の分布を求め、クラック発生頻度として基礎杭の損傷評価を行った。

図-15 は、左右両端が護岸になっているある埋立地における基礎杭のクラック発生頻度分布をコンター図で示したものである。また、コンター図の上段には残留水平変位(汎地球測位システム(GPS)測量を用いて地震前後の橋脚位置より求めた水平変位量)についても併記している。

基礎杭のクラック発生頻度が高い濃色部は、コンター図内に実線で示す旧地盤と埋立層の境界線より上方にほとんどが分布しており、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、杭中間部以深にもクラックが発生していることがわかる。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際の橋脚では、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。また、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。

なお、これら基礎杭の SIT より得られた損傷状況の分布は、ボアホールカメラ調査によって確認したクラック発生状況ともほぼ一致している。

図-16 は 18 本の杭が存在する橋脚内における各杭の損傷状況をクラック密度(発生クラック本数を杭長で除したもの)として一例を示したものである。橋脚柱部直下の杭(b-2 杭, b-5 杭)を除く測定可能な 16 本の杭をクラック密度によって評価した結果、クラック密度が 0.15 ~ 0.50 本/m(杭 1 本あたり 5~17 本のクラック)であり、全杭に損傷が発生していることがわかる。図-16 の太矢印で示した残留水平変位方向を考慮すると、手前列の右側の杭(c-6 杭)に比較的大きな引張応力が発生すると想像される。しかし、実際は全体的に顕著な傾向をうかがうことができないことから、基礎全体として応力を受け

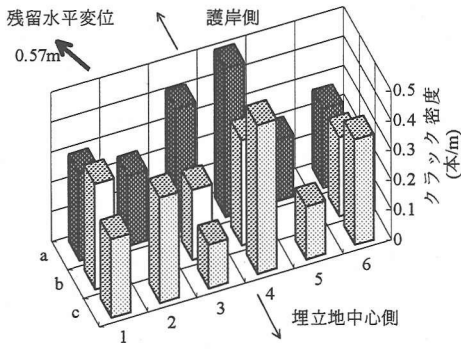


図-16 1橋脚内のクラック発生密度

ているものと推定できる。

以上のように、SITを用いることによって地震の影響による基礎杭の損傷状況の分布を確認することができる。また、1橋脚につき複数本数の調査を行うことによって橋脚全体の平均的な損傷程度が評価でき、地盤構成や地震による地盤あるいは橋脚変位量との相関性を検討することができる。

8. まとめ

本研究では、SITを地震により被災した基礎杭損傷調査に初めて適用し、その調査の適用性を高める波形処理解析手法を開発した。さらに、その解析結果を目視調査結果と比較することにより検証した。これらの結果から次のことが明らかになった。

- ① SITより得られる原波形から、フーチング上面からでも健全杭と損傷杭の判定を行うことができる。また、その時の測定限界角はフーチング下面から約4°程度である。
- ② 原波形に適切な波形処理を施し、繰返し反射波の除去とクラック発生深度の補正を行う解析手法を開

発した。この手法を用いれば原波形では判定困難である深い深度のクラック発生位置が確認できる。

- ③ SITデータの解析結果と目視結果との比較から、提案した解析手法の妥当性を検証した。
 - ④ 地震による基礎杭の損傷は埋地地盤内に多く分布している。
 - ⑤ 残留水平変位が大きく、護岸より100m以内に位置する基礎杭は杭体全体にクラックが発生している。
- なお、SITを基礎杭の損傷調査に適用するにあたり、クラックの幅が確認できないことや密集して発生した数本のクラックについてはまとめて1つのクラックとして判定される等の幾つかの課題が残されていることを付記する。

参考文献

- 1) 南荘淳, 足立幸明: 阪神高速道路における基礎構造物の損傷調査, 橋梁と基礎, 建設図書, Vol.30, No.8, pp.152-155, 1996.
- 2) 済木幸平, 佐々木努: 構造物のメンテナンス調査, 土と基礎, 土質工学会, Vol.37, No.1, pp.125-131, 1989
- 3) 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, pp.1-9, 1988
- 4) Van Koten H. and Middendorp P.: Interpretation of results from integrity tests and dynamic load tests, Application of stress-wave theory on piles, *A.A.Balkema*, pp.217-232, 1981.
- 5) (社)全国地質調査業協会連合: ポーリングポケットブック, pp.247-248, 1991.
- 6) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 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, pp.43, 1995.
- 7) Van Koten H. and Middendorp P.: Testing of foundation piles, *Heron*, Vol.26, No.4, pp.3-9, 1981.

(1997.8.21 受付)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ANALYTICAL TECHNIQUE FOR DAMAGE INVESTIGATION OF FOUNDATION PILES BY NONDESTRUCTIVE TEST

Tamotsu MATSUI, Atsushi NANJYO, Furitsu YASUDA, Yoshimasa NAKATA
and Kazuo IMADA

The nondestructive test (SIT) using the impact wave was applied to the investigation of foundation piles in Hanshin Expressway damaged by Hyogoken-Nambu Earthquake. On application of the test, the authors developed an analytical technique for the measured wave data, to remove some effects of the multiple reflected waves caused by the footing or the damage at around the top of pile. By comparing the analytical results with the visual investigated data, it was confirmed that the developed analytical technique was well applicable to the damage investigation of piles. Moreover, the authors tried to apply SIT with the developed analytical technique to damage investigation of piles in reclaimed ground, followed by elucidating the correlation between the degree of damage of piles and the residual displacement of ground or foundation.