

杭基礎の維持・管理および更新のための計測技術

Measurement Methods for Maintenance and Reuse of Piles

阿部 秋男 (あべ あきお)

㈱東京ソイルリサーチつくば総合試験所 室長

1. はじめに

近年、建築物や土木構造物の上部構造については維持管理のためのヘルスマニタリング技術が開発され、実用化されつつある。これに対して、基礎構造に関しては上部構造ほどの関心が持たれていないと思われる。

基礎構造は一旦施工されると、その生涯を通して目視確認されることはほとんどなく、構造の健全性や支持性能は、何らかの障害が生じた際にはじめて問題視されることになる。基礎構造についても上部構造と同じように定期的、あるいは継続的にヘルスマニタリングを行うことにより、障害を生じる前に対策を行い、維持することが可能になる。

また、上部構造を解体撤去した後で、新しい構造物の基礎として既存杭を利用した設計や施工が可能になれば、建設工事のコストダウン・工期短縮など直接的な効果があるとともに、昨今の社会的要求（環境負荷低減、循環型社会の構築、資源の有効利用など）に対しても大きな効果がある。また、既存杭を利用することにより、杭解体（引抜き）による地盤の攪乱を防止し、杭を支持する地盤の性能低下を防ぐという工学的な意味からの効果も期待できる。

既に建設されている建築物や土木構造物の基礎に対して新たにヘルスマニタリングのための装置を設置することは困難であるが、非破壊試験などの手法を適用して基礎構造の健全性を評価することにより、建築物や土木構造物を維持・管理することが可能になる。

ここでは、建築物や土木構造物の杭基礎の維持・管理や既存杭を利用する際に必要となる杭基礎の評価に適用可能な計測手法や非破壊試験とその適用について述べる。

2. 杭基礎のヘルスマニタリング

杭基礎を新設する際に、あらかじめセンサーとなる素材を杭設置の際に取り付けておき、常に杭の状態を監視することによりその性能を維持しようとする、ヘルスマニタリングの試みが始められており、今後重要になることが予想される。

この手法は、杭製造時または打設時にカーボン繊維や光ファイバーなどのインテリジェント素材をセンサーとして杭体に取り付けておき、電気抵抗や散乱光を測定することで、常時または定期的に杭の応力や変形の状態をモニタリングできるようにしておくものである。一般的

なひずみゲージ、ひずみゲージを用いた変換器を取り付ける方法も考えられるが、長期間のモニタリングではゲージの劣化などにより十分な成果が得られないことが考えられる。光ファイバーを用いる方法は、素材が経年変化を受けず、長期間にわたりモニタリングが可能な方法であるので、今後有望な方法であると考えられるが、現場での光ファイバーの接続の問題や、計測装置が高価であることなどから実用化にはもう少し時間を要する。

カーボン繊維センサーはコストも安く、取り付けや計測も容易であるので、近い将来実用化されると考えられる。カーボン繊維センサーは杭の鉄筋に取り付けられ、杭のひずみを計測することにより、杭の応力や変形の変化をモニタリングするものである。計測は電気抵抗の変化を測定するだけなので、簡易な計測装置により測定を行える。

カーボン繊維センサーの例を写真-1、2に示す。

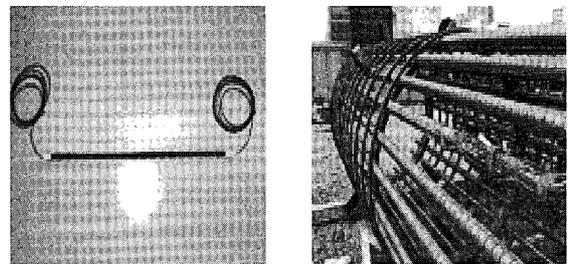


写真-1 カーボン繊維センサー 写真-2 センサーの取付け

3. 杭基礎の維持・管理および更新のために適用可能な非破壊試験

既に建設されている建築物や土木構造物の杭基礎の健全性を評価するためには、非破壊試験を実施することが有効である。適用が可能であると考えられる非破壊試験を表-1に示す。

表-1に示した検査方法のうち、杭の状態を最も直接的に確認できるものは、目視による杭体の観察である。また、杭体の健全性を比較的簡易に短時間で推定できる方法として、杭の健全性試験（以下、インテグリティ試験と表示）がある。目視観察を行う場合には掘削を行い杭頭部を露出させる必要がある。インテグリティ試験を実施する場合には、やはり杭頭部を露出させるか基礎スラブをコアリングするなどして、杭頭部にセンサーを設置する必要がある。これ以外の非破壊試験は試験の準備段階の作業に多大な労力を必要とするため、これらの二

表—1 杭基礎の維持・管理、更新の際の健全性評価に適用可能な非破壊試験

手法名	杭頭部分の目視観察	杭の健全性試験	ボアホールカメラ	超音波計測	傾斜測定	AE測定
概要	杭頭部分を露出させて直接観察する	弾性波の反射性状を利用して、杭長や損傷の有無を推定	ビデオカメラを用いて杭の状態を観察する	超音波により、杭コンクリートの状態や欠損を推定する	杭の中空部分を利用して杭の傾斜や曲がりを検出する	杭近傍にAEセンサーを設置して、杭の損傷箇所を推定
対象深度	地表面付近	60m程度	60m程度	60m程度	50m程度	50m程度
要する時間	10分	10分	1日	1日	1日	2日
確認できる項目	配置、杭頭の標高、傾斜、コンクリート・鉄筋の状態	杭の健全性、損傷位置	杭の健全性、損傷位置	杭コンクリートの健全性、断面欠損	杭の傾斜、曲がり	杭の健全性、損傷位置
適用できる杭種	埋込み杭 場所打ち杭	埋込み杭 場所打ち杭	埋込み杭 場所打ち杭	場所打ち杭	埋込み杭	埋込み杭 場所打ち杭

つの方法をまず実施することが適切である。これらの試験方法により、杭基礎の健全性をある程度評価することが可能である。

4. 既存杭を利用する際の杭の評価

既存杭の利用に当たっては、杭の諸元や経歴の確認が前提となる。すなわち、検査済証があることと杭体性能と支持性能が書類で確認できることが前提となる。また、既存杭の利用に当たっては、利用方法に応じた調査や再確認項目などが必要になることもある。

書類による調査では、既存杭の利用の可能性を検討する。この調査における既存杭の具体的な検討確認項目は、検査済証、建設年代、杭の諸元、支持地盤などである。

次の段階として現地における調査を実施する。既存杭の現地での調査は、非破壊試験を併用して実際の杭の性能を確認する。

5. 非破壊試験の方法

杭の評価の方法として適用可能な非破壊試験は先に表—1に示したものがあある。これらの測定手法のうち、目視観察、インテグリティ試験以外のものを適用する場合には、杭の中空部分を洗浄するか、測定孔を設ける必要がある。埋込み杭については、杭の中空部分を洗浄する必要があり、場所打ち杭については、あらかじめ測定管を設置してコンクリートを打設するか、あるいはコアリングを実施して測定孔を確保する必要がある。この測定孔を常に使用可能な状態に保てるように工夫してスラブ等を施工すれば杭基礎のモニタリングが可能になる。

5.1 目視による検査

杭頭を露出させて直接観察し、杭の配置や杭頭部の標高、状態を直接確認する。杭の配置や杭頭の標高はメジャーや測量器械を用いて測定し、設計図書と比較する。また、観察を行う際には、傾斜角の測定を行う。場所打ち杭では、杭側面の状態を観察することやコンクリートの被り厚さの確認、鉄筋の数量や配置を確認することも重要である。

5.2 インテグリティ試験

低ひずみの弾性波を利用して杭の健全性を検査する方法は、インテグリティ試験、ローストレイン法試験などと呼ばれており、杭に対する非破壊試験法の一つである。

この試験方法は、杭頭にセンサーを設置した上で軽打して弾性波を発生させ、その反射波を検出して杭の品質を評価するものである。

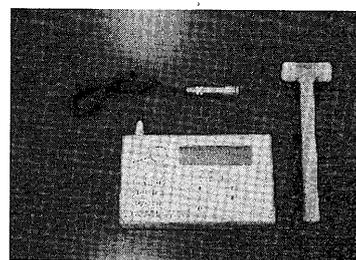
低ひずみの弾性波を用いた試験方法としては、これ以外にも定常加振やパルスによる加振を行い、共振周波数や伝達関数を求めてこれを解析するもの等があるが、反射波を解析する手法が最も良く利用されている。

インテグリティ試験装置の例を写真—3に示す。また、図—1に試験の概要を示し、図—2に測定波形例を示す。ハンドハンマーの打撃により発生した弾性波は、杭先端で反射する。この反射波の到達時刻から、杭長を推定する。杭に断面欠損やクラックなどの異常箇所があれば、その部分からも弾性波が反射することから、異常箇所を検出することができる。

健全性試験では、弾性波動を検知するセンサーとして、加速度計が用いられることが多い。したがって、得られる信号は杭頭部の加速度応答波形である。加速度応答波形は高周波の振動成分を多く含み、複雑な形をした場合が多い。そこで、通常これを積分して速度応答波形として表示する。このとき、図の縦軸（振幅軸）は、反射波を容易に確認できるように打撃による弾性波の入力時刻より、時間経過に伴い振幅を増幅する処理を行う。そのため、縦軸の値は相対値となる。

速度応答波形にすることで、発生する弾性波の杭頭部での応答は単純な形のガウス波形に近いものとなる。また、杭先端からの反射波も発生時の振動波形に近いものとして検出されることから、波形の判断を容易に行うことができる。さらに、波形を見やすいものとするために、ローパスフィルターを用いることもある。

また、健全性試験では、記録波形の横軸は時間軸で表



写真—3 インテグリティ試験装置の例

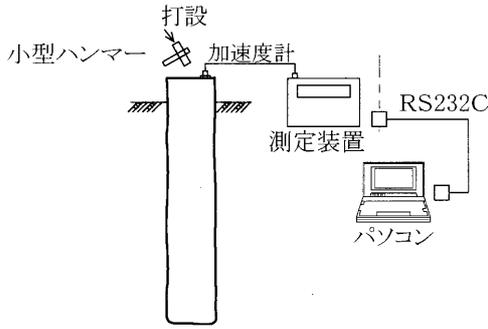


図-1 試験方法の概要

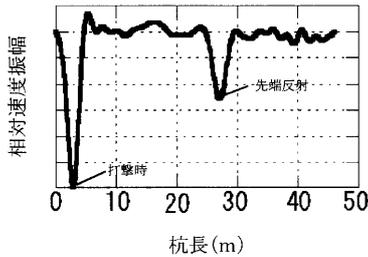


図-2 インテグリティ試験の測定波形例

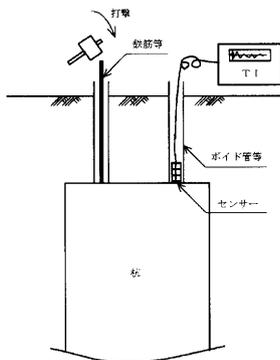


図-3 スラブ下の杭の測定

す場合もあるが、反射の位置からその反射が生じる深度を直接読みとれるように長さに換算して表示する場合が多い。

評価対象の杭が場所打ち杭であれば、新設のものでも、打設後時間が経過したものでもほぼ同等な評価が可能である。これに対して、既製コンクリート杭や鋼管杭では、打設後長い時間を経ていると大きな周面摩擦抵抗の影響で、長い杭では明瞭な結果が得られない場合もある。このような場合でも、全数検査を行えば波形の特徴や差違などを相互に評価することにより、ある程度の判断が可能である。

杭の上部にスラブや構造物が存在する状況で調査を行う場合には、上部構造の影響が測定結果に含まれる。このため測定時には、少なくともセンサーを杭体に直接設置する必要がある。上部構造の影響は解析的な方法によって除去することになる。また、2台のセンサーを深度の違う位置に設置して、それぞれのセンサーで記録される波形の位相差を利用することにより、上部構造の影響をキャンセルして、下部からの反射を抽出する測定方法もある。スラブやフーチングに図-3に示すような孔を確保しておけば、杭の状態を継続的にモニタリングする

ことが可能である。

5.3 ボアホールカメラを用いた杭体の観察

ボアホールカメラを用いた観察方法は、杭体を掘削機で削孔し、CCD (Charge Coupled Device) カメラ等を孔内に挿入して杭体の出来具合およびクラックなどの損傷状況を内部からリアルタイムに直接測定器のモニターにより観察する方法で、画像データは記録装置に記録される。

現在、杭体の観察に利用されているボアホールカメラには、数種類あり、それらはおおむね三つのタイプ、BIPシステム (Borehole Image Processing System)、BSM方式 (Borehole Scanner System typeM)、PIC方式 (Profile Inspection Camera) のいずれかに属している。

以下にBIPシステムの例を示す。BIPシステムは、図-4に示すように円錐型反射鏡で孔壁の定方位全周画面を取りこみ、ゾンデ (ボーリング孔内に挿入する測定器部分でプローブとも呼ばれる) 内のTVカメラから送られてくるアナログ画像信号をコンピュータ処理によりA/D変換し、リアルタイムに展開画像に変換、記録し、同時にモニターに表示する。

画像撮影時の方位測定は、方位計に内蔵されたコンパスで地磁気を検出して行う。

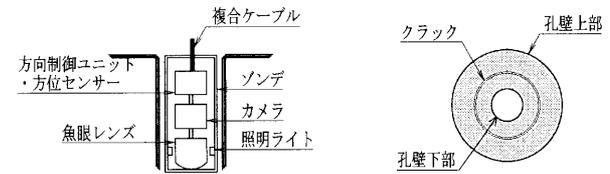


図-4 BIPシステム

ボアホールカメラでの展開画像の例を写真-4に示す。写真は、孔壁の様子を360°展開した画像である。写真に示すように、クラックがあればびび割れ幅の判定が可能である。

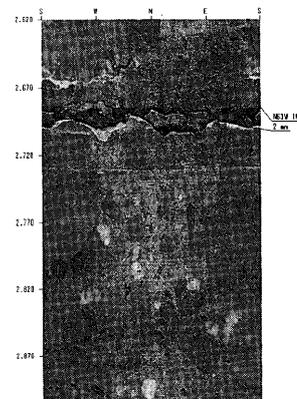


写真-4 孔内の展開画像 (場所打ちコンクリート杭)

5.4 超音波を用いた測定

測定孔の中に超音波の発振器および受振器を挿入して超音波速度を測定し、杭コンクリートの品質や断面欠損の有無を評価する調査方法である。

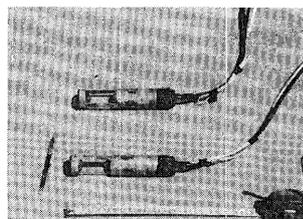


写真-5 超音波センサー

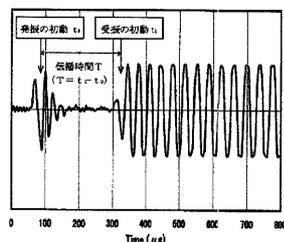


図-5 測定波形例

測定方法は一つの測定孔を用いる単孔法と複数の孔を用いる複孔法がある。

単孔法では測定孔に1 m程度の深度差で発振器と受振器を挿入して測定孔周辺のコンクリートの状態を調べる。複孔法では測定孔の配置により杭の周面に近い位置の断面欠損の有無を推定することが可能である。

写真-5は超音波センサーの例を、図-5には測定波形例を示す。推定されるコンクリートの弾性波速度が低い場合はコンクリートの品質に問題があることが考えられる。複孔法の測定結果により、ある特定の測線のみ弾性波速度が極端に低い場合には、その測線位置のコンクリートが欠損していることが考えられる。

5.5 杭の傾斜測定

傾斜計を埋込み杭の中空部分に挿入すれば、杭の建込み精度を検証でき、傾斜角の総和から杭に曲がりがあるかどうかを検証することもできる。また、傾斜の不連続箇所を検出することで損傷箇所を検出できる可能性もある。

現在傾斜計を杭中空部分に押し当てる方法として、ばねで作動するプレートを押し当てる方式と、パンタグラフ式のロッドを押し当てる方式などがある。

5.6 AE測定による検査

AE（アコースティックエミッション；音響放射）を利用して杭の健全性を検査する方法が実用化されている。この方法は杭の損傷箇所から放射されるAEを観測して損傷箇所を特定する検査方法である。

この方法の利点は、杭頭を露出させなくても検査が可能である点にある。このため、維持・管理や既存杭の利用の際の健全性の検査方法として有効である。

測定は検査対象の杭から数 m 離れた場所にボーリングを行い、このボーリング孔内にAEセンサーを挿入して杭から放射されるAEを観測する。AEの放射がなければ杭は健全であると判定される。

図-6にAE測定による健全性検査の概念を示す。

5.7 その他の検査方法

以上に述べたほかに、杭の検査方法として使われてい

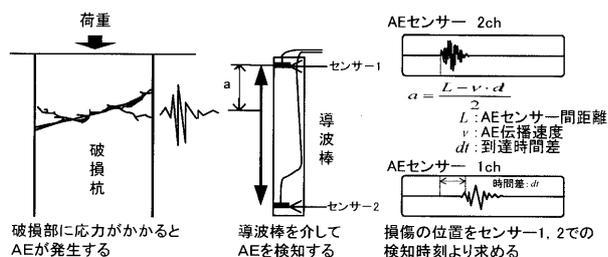


図-6 AE測定による健全性検査の概念

るものとしては、ポアホールソナー、ポアホールレーダーなどの方法がある。

ポアホールソナーによる方法は、音波または超音波の反射を利用するもので、発信機と受信機が内蔵されたゾンデを孔内に挿入して発信機から、音波ビームを発信し、孔壁や杭の外周面からの反射波を受信機で受信し、反射波の振幅と反射波到達時間の両方から杭体のクラックや断面形状などを確認する。

ポアホールレーダーによる方法は、音波より高い周波数（数十MHz～数百MHz）の電磁波を利用するもので、岩盤探査の反射法に用いられている方法を杭体の検査に適用したものである。検査方法は、送信・受信アンテナを同一孔内に挿入して一定間隔（20 cm～100 cm）毎に停止しながら電磁波を発信し、その反射波を受信して深度方向の時間断面図を作成し、杭体の出来具合およびクラックなどを確認する。

6. まとめ

今後、新築の建築物や新設の土木構造物に対する継続的な性能の表示を要求されるケースが増加することが考えられる。また、既存の基礎構造を利用するケースも増加するものと思われる。

こうした社会的要求に答えるために、上述の計測技術の重要性は今後さらに高まることが予想され、低コストで精度の高い計測技術の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 加倉井正昭・山下 清：杭基礎設計の最近の動向 IV 杭の性能評価技術の最近の動向，建築技術，3月号，1994.
- 2) 阿部秋男・田村昌仁：基礎の被害調査方法，建築技術9月号，pp. 63～67，1995.
- 3) 阿部秋男：杭の健全性の評価，基礎工，Vol. 24, No.11, pp. 22～29，1996.
- 4) 大塚雅裕：構造物健全度調査技術の現状と展望，地質と調査，第2号，pp. 8～13，2002.
- 5) 石井 清・稲田 裕・杉村義広：炭素繊維束センサの開発と性能評価，杭の健全性モニタリング手法の開発（その1），日本建築学会構造系論文集，第557号，pp. 129～136，2002.
- 6) 稲田 裕・石井 清・杉村義広・佐々木建一：炭素繊維束センサの杭の損傷検知に対する性能評価，杭の健全性モニタリング手法の開発（その2），日本建築学会構造系論文集，第563号，pp. 91～98，2003.
- 7) 財団法人地盤基礎専門部会（2003）：既存杭利用の手引き。

（原稿受理 2004.1.6）