# 新型ボアホールレーダによる場所打ち杭の出来形の可視化

勝 二 理 智 萩 原 由 訓

# 藤森健史

# Visualization of Finished Shape of Cast-in-place Pile by New Borehole Radar

Michito Shoji Yoshinori Hagiwara

Takeshi Fujimori

# Abstract

In the construction of cast-in-place piles, after inserting a rebar cage into the holes previously drilled in the ground, concrete is cast. In general, confirmation of the finished shape after concrete placement is frequently omitted by confirming the shape of the drilled hole by ultrasonic measurement. In recent years, the need for quality confirmation has been increasing. Therefore, for visualizing the finished shapes of cast-in-place piles, we developed a new borehole radar and devised a new test method. To examine this technology, borehole radar tests were conducted for actual cast-in-place piles in the air and under the ground. The effectiveness of this technology was confirmed by comparing the results with the measurement result of the finished shape of the pile surface.

#### 概 要

場所打ち杭は、地盤中に削孔・形成した孔内に、鉄筋かごを挿入してコンクリートを打設することにより施工 する。孔の形状を超音波測定により確認し、杭の出来形の確認は一般的に行わない。将来的な品質確認技術の一 っとして、分解能を高めることで、杭の位置や長さの確認のみならず、杭表面の出来形を確認できる新型ボアホ ールレーダを開発するとともに、評価精度を向上できる試験方法を新たに考案した。本技術の検証のため、場所 打ちコンクリート杭工法で作製した試験体を対象に、気中時および地中埋設時にボアホールレーダ試験を実施 した。杭表面の出来形の実測結果と比較し、本技術の有効性を確認した。

# 1. はじめに

場所打ち杭の施工にあたっては、あらかじめ地盤中に 削孔された孔内に、鉄筋かごを挿入したのち、コンクリ ートを打設する。削孔した孔の形状について超音波測定 により確認し、コンクリート打設後の出来形の確認は一 般的に行わない。ここで、現在ある技術で杭の出来形を 確認しようとすれば、弾性波を用いて杭の断面形状を調 べるボアホールソナー試験を適用する、あるいは、電磁 波を用いて杭の位置や長さを調べるボアホールレーダ試 験を準用する、等が考えられる。

ボアホールソナー試験は,もとは地盤改良コラムの品 質評価のため開発された方法<sup>1)</sup>で,既製コンクリート杭 の根固め部や場所打ち杭の拡底部の形状評価にも用いら れている<sup>2),3)</sup>。試験では,杭内部に鉛直に設けた試験孔に センサー部を挿入し,杭径方向に弾性波を放射し,杭と 地盤の境界面で反射する波を受信して杭径を評価する。 試験にあたり杭体のボーリングが必要であり,非常にコ ストが高く,杭を傷つけることにもなる。また,評価に 用いる弾性波の伝播速度はコンクリートの品質に依存す るため,採取コンクリート片の要素試験を深さごとに実 施しないと評価精度が低下する,といった課題もある。

ボアホールレーダ試験は,埋設物調査のため地表で実 施される地中レーダ試験の一種であり,従来は,杭位置 や杭長を調べることを目的としている<sup>4),5)</sup>。試験では,杭 横の地盤に鉛直に設けた試験孔にセンサー部を挿入し, 杭に向かって電磁波を放射し,杭から反射してくる信号 (波形)を受信して杭体の存在を評価する。得られた波形 を深さ方向に並べ,波形の振幅の大きさを濃淡で表示し た2次元断面図を作成し,データ分析を行うのが一般的で ある。試験のための地盤ボーリングは,杭体ボーリング より低コストかつ短工期で施工可能である。一方で,地 中での電磁波の減衰は大きく,評価に用いる電磁波の伝 播速度も深さによって異なる,といった課題があるため, これまで杭の出来形評価には活用できなかった。

そこで、将来的な品質確認技術の一つとして、場所打 ち杭の出来形の可視化を目的として、新型ボアホールレ ーダ(以降、新型BHRと称する)を開発し、試験方法を新 たに考案した(Fig. 1)。詳細は2章で述べるが、センサー 部内部のアンテナの向きを工夫し、指向性を持たせるこ とで、電磁波の信号強度を高め、杭から十分な反射波が 得られるようにした。また、杭の方位に加えて、別途設 置する鋼管の方位、および設置物が存在しない地盤の方 位でも試験し、それらを統合処理することで、評価精度 を向上できる。

本技術の検証のため、場所打ちコンクリート杭工法で 作製した試験体を対象に、気中時および地中埋設時にボ アホールレーダ試験を実施した(Fig.2)。本報では、新型 BHRと試験方法の概要,および検証実験内容について述べる。

# 2. 新型BHRと試験方法

### 2.1 新型BHRの概要

新型BHRの構成概要図をFig. 3, 仕様をTable 1に示す。 新型BHRは, アンテナ・送受信回路・無線LANユニット 等を内蔵するセンサー部, 吊り下げベルト・リール・モ ーター等を内蔵する昇降装置で構成され, システムコン トローラーであるPCにインストールしたアプリケーシ ョンにより操作する。

杭表面の出来形評価に用いるためには、一般的な杭位 置等の測定に用いられるアンテナより高分解能なものが 必要であることから、新型BHRでは、高い周波数特性を 持つアンテナを用いている。アンテナの向きについて、 一般的には、試験孔に挿入するセンサー部径の制約から、 アンテナの長軸を鉛直方向に向けるが、アンテナの偏波 面(振動する面)と杭の水平断面が直交するため、深さ方 向の断面変化の分解能が下がる。そこで、新型BHRでは、 アンテナの長軸を水平方向に向けている。さらに、通常、 アンテナは正面・背面の双方に電磁波を放射し、指向性 を持たないため、探査対象以外からの反射の影響が避け られない。そこで、新型BHRでは、アンテナの周囲にシ ールド処理を施すことで、正面90度(±45度)の範囲にの み電磁波を放射するよう工夫した。



場所打ち杭 試験孔 鋼管 Fig. 1 新型BHRを用いた試験方法 Test Method by New Borehole Radar



Fig. 2 試験状況 Test Situation

2.2 レーダ試験の概要

試験は以下の手順で実施する。

- (1) 杭横の地盤に, 試験孔(塩ビ管)と鋼管を所定の離隔 をもって施工する。
- (2) 試験孔の上部に昇降装置を設置し、センサー部が試験孔内を垂直に進むように固定する。
- (3) 測定する方位を決めて、試験孔内にセンサー部を挿入し、深さ方向に進める。
- (4) 方位を変えて測定を繰り返す。

上記により全方位の測定データを得たのち,以下の手 順で分析する。

- 杭や鋼管が無く地盤のみがある方位のデータを加算 平均することで、ランダム雑音を除去した地盤反射 を得る。
- (2) 鋼管に正対する方位のデータから、(1)の地盤反射を 差し引くことで、鋼管からの反射波を抽出する。
- (3) (2)の鋼管反射の伝播時間と、試験孔と鋼管の離隔距



Fig. 3 新型BHRの構成概要図 Equipment Outline of New Borehole Radar

Table 1 新型BHRの仕様 Specifications of New Borehole Radar

項目	内容
探查方式	電磁波レーダ方式(パルス型)
探查対象	杭表面の出来形
機器構成	センサー部(アンテナ,回路,無線LAN等)
	昇降装置(ベルト,リール,モーター等)
サイズ	センサー 140φ×375mm
	昇降装置 480×250×260mm
アンテナ周波数特性	带域600~3400MHz, 中心2000MHz
アンテナ指向性	90度 (±45度)
アンテナ配置	深度方向に直交配置
測定時間・点数	16ns(ナノセック)・768点
測定データ	深さ方向かつ全方位の3次元データ
	(反射波形,鉛直断面図,放射掃引図)
アプリ機能	測定時リアルタイム処理(地盤反射との差分)
	地中での伝播速度(比誘電率)の推定
	伝播時間から離隔距離への換算

離を用いて、地中における電磁波の伝播速度を算出 する。なお、その伝播速度c'は、真空中の伝播速度cと地盤の比誘電率Erより、c'= $c/\sqrt{Er}$ の式で表される。

(4) 杭に正対する方位のデータから、(1)の地盤反射を差し引き、杭表面からの反射時間を求める。それに(3)の伝播速度を乗じることで、杭表面の出来形(杭鉛直断面と試験孔の離隔距離)を評価する。

# 3. 検証実験方法

#### 3.1 検証に用いた杭の概要

検証実験には、場所打ちコンクリート杭工法(アースド リル工法)を模擬して作製した試験体を用いた。杭径は約 2300mm, 鉛直高さは約2000mm, コンクリートの設計基 準強度は30N/mm<sup>2</sup>,主筋は32-D32, フープ筋はD13@300, 鉄筋のかぶり厚は100mmである。試験は、杭表面に勾配 がある断面1,人工的に凹部を設けた断面2,平坦な断面 3の計3か所について実施した。

検証実験に先立ち,杭の表面形状を3次元レーザースキ ャンにより実測した。得られた点群座標データについて, 新型BHRのアンテナ指向性と分解能を考慮して,水平方 向は円弧長さ20度分,鉛直方向は10mm分の加算平均を 行い,表面形状の座標を算出した(Fig.4)。図の縦軸は杭 天端からの深さ,横軸は杭心からの水平距離である。断 面1では,杭天端-600mmから-800mmにかけて150mm程度 の勾配がある。断面2では,杭天端-1150mm位置に鉛直幅 150mm程度,奥行き幅60mm程度の凹部がある。断面3で は,杭天端から杭先端にかけて概ね平坦で,大きな勾配 や凹部は無い。

また検証にあたっては、地中実験に先立ち、新型BHR の精度確認のため気中実験を実施した。

#### 3.2 気中実験方法

気中実験方法の概要をFig.5に示す。杭の周囲に枠組足 場を設け、レーダ試験を実施する作業ステージを杭天端 から500mm上方に架けた。杭横に新型BHRを挿入する試 験孔(塩ビ管)と、伝播速度を求めるための鋼管を垂直に 立て、管の上部は足場から伸ばしたブラケット、下部は



土間コンクリートに緊結した。試験孔を挟んで杭と鋼管 が対になるよう配置し、管天端は作業ステージから 500mm突出させた。レーダは性質上、金属からの反射が 顕著になることから、試験孔と枠組足場が十分離れるよ う留意した。

レーダ試験では、方位を一定に保ちながら、試験孔天 端から杭先端まで測定を実施した。そして、22.5度ずつ 方位を変えた測定を繰返すことで、全方位のデータを取 得した。杭や鋼管がある方位は、それらが無い方位から 90度回転した方位にあたる。深さ方向には10mmピッチ で測定した。

#### 3.3 地中実験方法

地中実験方法の概要をFig.6に示す。杭埋設範囲を掘削 し,根切り底に捨てコンを打設したのち,杭を設置した。 杭横に試験孔(塩ビ管)と鋼管を垂直に立て,管の上部は 杭天端に固定した単管,下部は捨てコンに緊結した。掘 削した関東ロームを電動ふるい機で分別し,粒径の大き な礫やガラを取り除いたのち,転圧しながら埋め戻した。 試験孔を挟んで杭と鋼管が対になるよう配置し,管天端 は埋戻し後の地表面から500mm突出させた。レーダ試験 については,気中実験時と同様に測定した。



#### 4 検証実験結果

#### 4.1 気中実験結果

まず, 断面1の気中レーダ試験結果として, 鋼管に正対 する方位で得られた鉛直断面図と波形をFig.7に示す。断 面図の縦軸は杭天端からの深さ,横軸は伝播時間であり, 代表して青線の深さにおける波形を示している。なお, ここでは気中実験について述べるが、便宜上、地中実験 時と同様に,杭と鋼管が存在しない方位のデータを"地盤 反射"と称している。

Fig. 7(a)は, 2.2節で示したデータ分析(2)地盤反射との 差分処理を実施前の図である。波形に最初に現れる正負 の大きな振幅は、放射した電磁波が受信アンテナに直接 干渉した直達波と、試験孔と地盤の境界面の反射波が合 成されたもの(以下,表面波)で,断面図の黒縞と白縞に あたる。それ以降もリンギング(余分な反射波)が生じて おり、この状態では鋼管反射を抽出できない。

そこで、杭や鋼管が無い方位で得られた地盤反射との 差分を取り,表面波とリンギングを除くことで,Fig.7(b) が得られる。鋼管反射は、波形の最初に現れる大きな振 幅であり、断面図の白縞にあたる。

伝播時間(ns)

6

2 3 4 5

0 1

250

500

750

000

250

500

750

2000

杭天端からの深さ(mm)

伝播時間(ns)

3 4 5 6 7

鉛直断面

波形

BHR Result in the Air

ら<u>の</u>深さ(mm) -50

-1000

-2000L

比誘雷率

(b) 比誘電率

(a) 差分処理前

0, 0, 1 2

250

500

750

1000

250

500

750

Fig. 7

(mm -500

-) か影の-1000

-2000

伝播速度(×10<sup>8</sup>m/s)

(a) 伝播速度

抗天端からの深さ(mm)

振幅

図より読み取った鋼管反射の伝播時間と、施工した試 験孔と鋼管の離隔距離を用いて算出した、電磁波の伝播 速度と比誘電率をFig. 8に示す。図には試験した3断面の 結果を示している。当然ではあるが、伝播速度は概ね 3×10<sup>8</sup>m/s,比誘電率は概ね1であり大気中の値に等しい。 続いて、上記の伝播速度を乗じて距離に換算した、気 中レーダ試験結果をFig.9に示す。左図は鋼管に正対する





-断面1

方位の断面図,中央の図は杭に正対する方位の断面図で あり,鋼管と杭からの反射として読み取る縞模様を矢印 で示している。右図は,さらに,この杭反射の読取線を 重ね描いた図である。どの断面においても,鋼管反射・ 杭反射ともに明瞭である。

さらに,気中レーダ試験結果と実測結果を比較して Fig.10に示す。ここで,実測結果とは,Fig.4で示した3次 元レーザースキャンにより実測した杭の表面形状である。 杭天端から杭先端まで概ね整合しており,新型BHRの妥 当性を確認できる。一方で、断面2の杭天端-1150mm位置 の凹部について、鉛直幅は良く対応しているが、深さは 実測より浅く評価している。この結果より、深さ60mm程 度の凹部を識別できるものの、深さの分解能は低下する ことが確認できる。これは、凹部の鉛直幅が狭くなると、 最深部からの反射だけでなく、その前後の傾斜部からの 反射も含まれるためと考えられる。





BHR Result Converted into Distance

#### 4.2 地中レーダ試験結果

まず,断面1の地中レーダ試験結果として,鋼管に正対 する方位で得られた鉛直断面図と波形をFig.11に示す。 断面図の縦軸は杭天端からの深さ,横軸は伝播時間であ り,代表して青線の深さにおける波形を示している。 Fig.11(a)より,気中試験時と同様に,表面波とリンギン グを確認できる。Fig.11(b)に示すように,差分処理によ り鋼管反射を抽出することで,その伝播時間が気中試験 時より遅くなっていることが明瞭になり,伝播する媒質 が大気から土になった影響を確認できる。また,伝播時 間は深さ毎に異なっており,地盤中の比誘電率が深さに より変化していることを確認できる。

図より読み取った鋼管反射の伝播時間と,施工した試 験孔と鋼管の離隔距離を用いて算出した,電磁波の伝播 速度と比誘電率をFig.12に示す。図には,試験した3断面 の結果を示している。深くなるにつれて,伝播速度は遅 くなり,比誘電率は大きくなることを確認できる。一般 的には,地盤中の比誘電率を仮定し,深さ方向にも一定 として伝播速度を設定するが,今回開発した試験方法を 用いることで,深さ毎の伝播速度を直接評価し,比誘電 率の変化も推定可能であることを示した。

続いて,上記の伝播速度を乗じて距離に換算した,地 中レーダ試験結果をFig. 13に示す。左図は鋼管に正対す る方位の断面図であり,鋼管からの反射として読み取る 縞模様を矢印で示している。どの断面においても,気中 試験時と同様に,鋼管反射は明瞭である。

中央の図は杭に正対する方位の断面図である。右図は、 さらに、Fig. 4で示した3次元レーザースキャンにより実 測した、杭の表面形状を重ね描いた図である。これらの 結果より、杭反射と思われる縞模様を確認できるものの、 Fig. 9の気中試験結果に比べてノイズが多く、判別しづら い。気中と異なり、地中における電磁波の伝播特性は一 様ではなく、理想的なパルス波形とならない。2章で挙げ た分析手法により、信号(波形)のSN比および鉛直断面図 の視認性の改善に一定の効果は見込めるものの、さらな る評価精度の向上には、試験結果の蓄積により、パター ン認識できるようにする必要があると考えられる。

### 5. まとめ

場所打ち杭の出来形の可視化を目的として,新型ボア ホールレーダを開発するとともに,試験方法を新たに考 案した。本技術の検証のため,一部を切り出した実際の 場所打ち杭を対象に,気中時および地中埋設時のボアホ ールレーダ試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 新型BHRでは、アンテナの向きを工夫し、指向性を持たせることで、電磁波の信号強度が高まり、杭からの 十分な反射波を得ることが可能となった。
- 2) 試験にあたり, 杭方向のみならず, 別途設置する鋼管の方位,および設置物が存在しない地盤の方位も探査し, それらを統合処理することで, 評価精度を向上させることができた。
- 3)今回開発した試験方法を用いれば、地盤中の深さ毎の 伝播速度を直接評価し、比誘電率の変化も推定可能で あることを示した。

今回の検証実験によれば、より合理的な評価のために は、試験結果の蓄積や信号・画像処理のさらなる高度化 が必要と考えられる。しかしながら、課題は残るものの、 今まで出来なかったボアホールレーダによる場所打ち杭 の出来形可視化の可能性を見出すことができた。

### 謝辞

新型ボアホールレーダの開発は,(株)計測技術サービ スとの共同研究によるものであり,多大なご協力を頂き ました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 牧原依夫,田村昌仁,斉藤顕次:ボアホールソナー による改良地盤の改良範囲測定方法の開発,日本建 築学会学術講演梗概集B-1,pp.555-556,1996.7
- 2) 中村博,藤井衛,阿部秋男,加藤洋一:ボアホール ソナーによる埋込み杭根固め部の形状評価手法に関 する研究,日本建築学会技術報告集,No.23, pp.27-31, 2006.6
- 3) 椿原康則,阿部秋男,山下清:ボアホールソナーに よる場所打ち拡底杭の形状調査,日本建築学会学術 講演梗概集B-1, pp.527-528, 2004.7
- 4) 建設省土木研究所,清水建設,基礎地盤コンサルタンツ,日本工営:ボアホールレーダ法を用いた橋梁 基礎の形状調査法マニュアル(案),1999.3
- 5) 物理探査学会:物理探査ハンドブック 手法編 第 7章 地中レーダ,1998