

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

An evaluation method on the shape of foot protection around the bored pile using borehole sonar

中村 博 _____ *1 藤井 衛 _____ *2
 阿部 秋男 _____ *3 加藤 洋一 _____ *4

Hiroshi NAKAMURA Mamoru FUJII
 Akio ABE Yoichi KATO

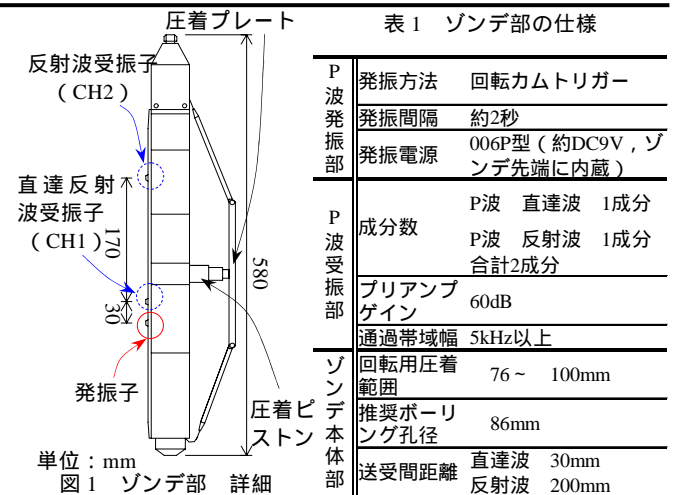
キーワード：
 埋込み杭，P波，根固め，変動係数，
 ボアホールソナー

Keywords：
 Bored pile, P wave, Foot protection, Coefficient of variation, Borehole sonar

In this paper, we deal with the application of borehole sonar to evaluate the shape of foot protection around the tip of the bored pile. We measured reflection waves at 24 points at intervals of 15 degrees in the pile using a sonar set in the hole. Five kinds of model foot protection and a prototype were used for the experiments. We found that the shape of the five kinds of model foot protection were caught clearly by analyzing the reflection waves. And we confirmed that it was true for the case of the prototype in the field.

1. はじめに

現在、既存杭の再利用の調査や施工された杭の健全性の評価手法として、インテグリティ試験、超音波の利用、ボアホールカメラによる観察、ボアホールソナーなど数多くのものがある。インテグリティ試験（IT試験）は、杭頭部に小型のハンドハンマーによる打撃を加え、発生した弾性波の杭先端からの反射波の到達時刻から杭長を推定する方法であり、築造された杭の長さや健全性の評価に用いられている^{1)~4)}。超音波を用いた方法は、イギリスやオランダなどヨーロッパ諸国で場所打ち杭の品質評価手法として用いられている方法であり、測定孔の中に超音波の発信器および受信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を調査する方法である^{5),6)}。ボアホールカメラを用いた方法とは、掘削機で削孔した杭体内部に、CCDカメラを挿入し、杭体の出来ばえを調査する方法であり、目視で観察できるところに大きな利点がある。その他、最近では、既存の杭体の中心位置に内径8cm程度の孔を設け、その中に高性能レーダーを挿入して、既存杭の鉄筋位置や杭半径を探索するパイルレーダーを用いた手法も登場している⁷⁾。このように、いわゆる物理探査手法は時代のニーズに合った種々のものが開発され、科学技術の発展とともに性能が向上してきた。筆者らは、（独）建築研究所が中心となって開発したボアホールソナーに着目し、直達波と反射波が同時に測定でき、埋込み杭先端部の根固め部においても反射波が得られることを目的に開発された測定器を用いて、埋込み杭拡大根固め部の形状評価手法としての適用性とその精度について調査した。実験は、根固め部を想定して作製した模型試験体と実大杭の根固め部について行った。



2. 測定器と測定方法

本装置の基本的原理は、主に杭体の長さ方向の測定を目的としたIT試験と同じであり、対象物に人工的な衝撃を加えることによりP波を発生させ、根固め固化体の境界からの反射波を読み取ることによって、固化体の形状の推定を行おうとするものである。ただし、ボアホールソナーはIT試験と異なり、図1に示すように1つのゾンデ部に発振子が1つ、受振子が2つ搭載されている。表1にゾンデ部、表2にデータ収録装置部の仕様を示す。

測定方法としては、まず、測定孔にボアホールソナー（以後ソナーと呼ぶ）を挿入し、コンプレッサにより圧力（約400kPa）を加えることにより、圧着プレートを作動させ、孔壁にゾンデ部を圧着さ

*1 兼松日産農林株式会社 ジオテック事業部
 （〒102-0083 東京都千代田区麹町3丁目2番地）
 *2 東海大学工学部建築学科 教授・工博
 *3 株式会社東京ソイルリサーチ 工博
 *4 三谷セキサン株式会社 技術部 部長代理 技術士

*1 Kanematsu-NNK Corporation, Geotec Div.
 *2 Prof., Dept. of Architecture and Building of Engineering, TOKAI Univ., Dr. Eng.
 *3 Tsukuba General Laboratory, Tokyo Soil Research Corporation., Dr. Eng.
 *4 Mitani Sekisan Corporation., Consultant Eng.

せる .そして ,パソコンを操作することにより ,図 2 に示すように , P 波を図 1 の発振子から起振し ,発振子から 30mm 離れた CH1 の受振子および 200mm 離れた CH2 の受振子にて ,図 3 に示すように ,P 波の直達波と反射波を同時に測定する .各測定箇所において ,数回同様の操作を繰返し ,スタッピング (同一測定点で複数回計測を行い ,得られた計測波形を平均化する処理)することによって ,ノイズ成分を軽減させた .このようにして ,各測定位置において ,15°きざみでソナーを回転させ ,360°すなわち 24 測定点において計測を行った .

表 2 データ収録装置部の仕様

AD変換部	入力電圧範囲	±5V
	成分数	2成分 (受振部用)
	分解能	14dB
	サンプリング速度	1MHz
	データ出力コード	オフセットバイナリー
	インターフェース	USB1.1
増幅部	バッファメモリ	32768W/16bit
	成分数	2成分
	通過帯域幅	5kHz
	ハイパスフィルター	5kHz
制御およびデータ処理部	搭載パソコン	B5 ノートサイズ CF-T2AW1AXR
	寸法	360W×270D×90H
収録装置外形	重量	5kg以内
	電源	DC12V±0.5V 36VA
		(PC付属のDCアダプタを使用可)

3. 弾性波速度と反射時間の求め方

弾性波速度 V は ,直達波が 2 つの受振子に到達する時間差を計測することによって可能となる .今 ,図 3 に示すように ,CH1 受振子と CH2 受振子の波形が変化する際の初動時間を図 4 に示すように ,それぞれ t_1 (CH1 の正の初動ピーク時間)と t_2 (CH2 の負の初動時間)として ,(1) 式によってその差 t を求めた .そして ,CH1 受振子と CH2 受振子間の距離 170mm を t で除し ,さらにこの 24 計測点の平均値を弾性波速度とした .この弾性波速度に ,図 3 に示すように反射時間を乗ずることによって ,測定孔外縁部から固化体外縁部までの長さを求めた .反射時間は ,図 5 に示すように ,CH2 受振子から得られた波形における正の初動ピークを反射波とした .そして ,(2) 式より ,固化体外縁までの距離を求め ,その位置を円周方向に結び合わせることによって形状を推定した .

$$t_2 - t_1 = t \quad (1)$$

$$\bar{V} \times (T/2) = L \quad (2)$$

t_1 : CH1 (正) 初動ピーク (s) t_2 : (負) CH2 初動ピーク (s)

t : CH1 と CH2 の時間差 (s) \bar{V} : 平均弾性波速度 (m/s)

T : (正) 初動ピーク 反射時間 (s) L : 推定距離 (m)

なお ,図 6 に示すように ,発振子と受振子またはそのいずれかが孔壁に密着していないと反射時間 (T) が明確に読みとれない .

4. 根固め部模型試験体における実験

4.1 実験概要

根固め部の模型試験体は ,直径 550mm ,高さ 500mm であり ,W/C は 70% ,セメント添加量は土 1m³ あたり 983kg のセメントと水の固化体である .この固化体に図 7 に示すように各種の切り欠きを設けた .計測は 3 で述べた方法によって行い ,得られた結果をもとに形状や寸法の予測をした .また ,図 8 に示すように ,形状の変化部は

波形が乱れると仮定し ,図 9 に示すように CH2 受振子によって得られた各測定点における波形の 2 つめの不連続点を表す時間の変動係数と実形状の変動係数を比較した .特に 2 つめとしたのは ,もし ,その方向に欠損箇所があれば ,1 つめの不連続点より ,より幾何的な影響を受けた結果として評価できると推察したからである .

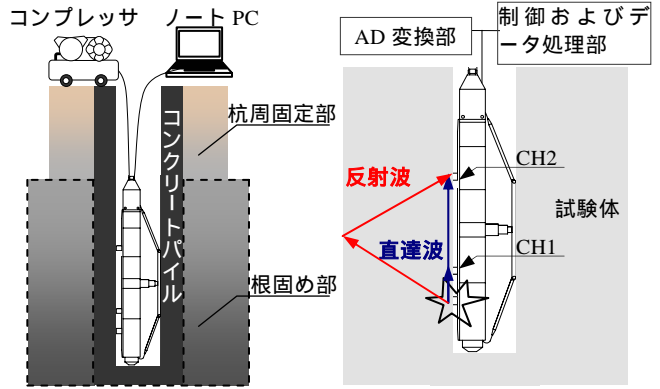


図 2 測定原理

図 3 直達波と反射時間を表す模式図

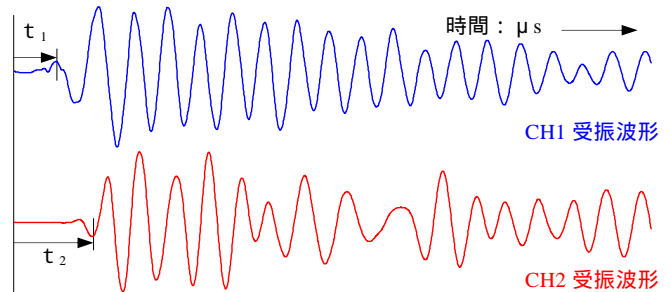


図 4 伝播時間の求め方

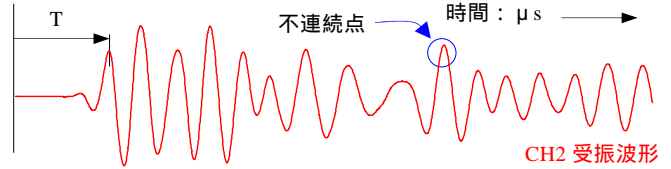


図 5 反射時間 (T) の推定

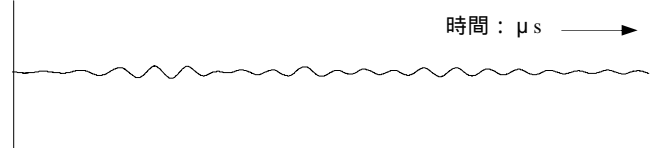


図 6 発振子と受振子あるいはいずれか一方が孔壁に密着していない場合の波形

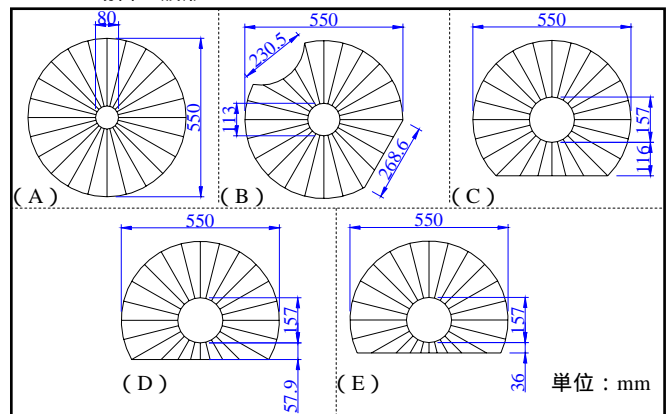


図 7 模型試験体

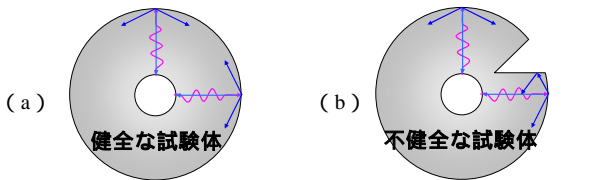


図8 健全な試験体と不健全な試験体の反射性状

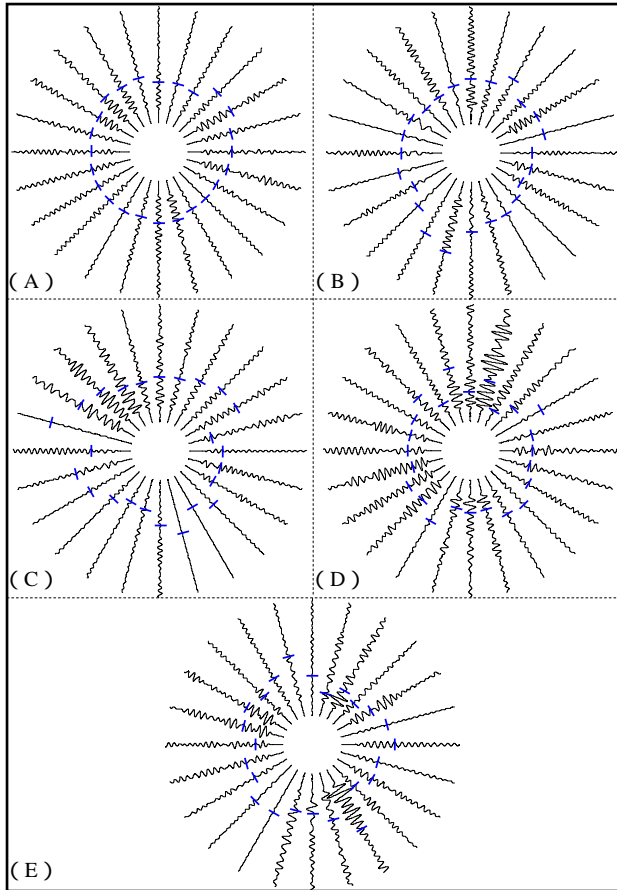


図9 波形の不連続位置を現す同心円状グラフ

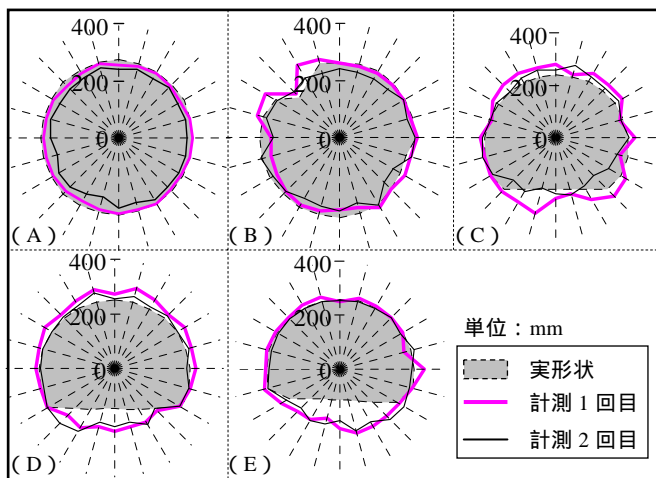


図10 試験体の実形状と推定形状

表3 試験体の実形状と推定形状

試験体記号	推定結果と考察
A	実形状と推定形状は非常によく一致しており、平均誤差は3%程度であった。
B	多少欠損部がデフォルメされた形で現れているが、平均誤差は13%程度であった。
C	平均誤差は13%程度であり、概ね欠損部をとらえている。
D	平均誤差は、17%程度であり、比較的明瞭に欠損部が現れている。
E	平均誤差は25%程度で、やや小さめに欠損部分を評価しているが、欠損部の存在は概ねとらえている。

4.2 根固め部試験体の推定形状

図10は各試験体の実形状と推定形状の比較を示したものである。図10を見ると、形状が急激に変化している箇所において波が乱反射していると思われる。その結果、局所的に推定形状に凹凸が現れる傾向にある。このことから表3に示すように、欠損部が大きいほど、推定形状が明確にとらえられたと推察される。

4.3 反射波の不連続位置の変動係数と実寸法の変動係数の比較

図11は実寸法の変動係数と図9に示す2つめの不連続点の変動係数とを比較したものである。両者の間には、予想したように明確な相関性の存在が認められ、(3)式のような関係としてまとめることができた。

$$V_r = 0.003 V_t^{3.432} \quad (3)$$

V_r : 実寸法の変動係数 (%)

V_t : 不連続点の計測時間における変動係数 (%)

したがって、本評価方法により根固め液固化体の寸法のばらつきを評価することは、十分に可能であるとわかった。

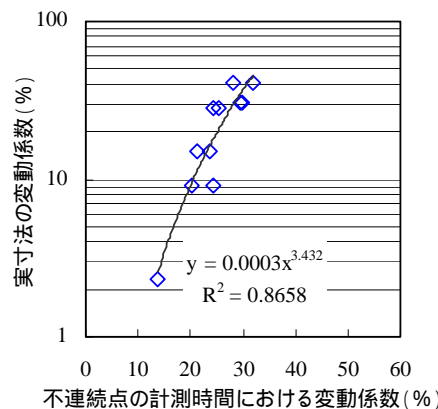


図11 実寸法と不連続点の変動係数比較

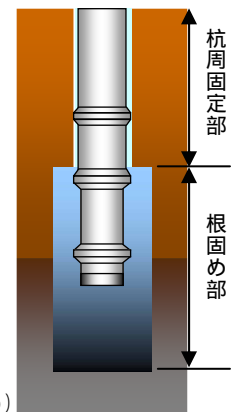


図12 実大杭の先端部状況

5. 実大杭における実験

5.1 実験概要

計測の対象とした実大杭は、根固め拡大工法によって施工された節杭の形状をなすものであり、杭先端部は図12に示すような状況である。根固め液、杭固定液とも W/C は 60% であるが、根固め部はセメントミルクでほぼ完全置換された状況に近く、杭周固定部はソイルセメント化している状況になっているものと推察される。杭周

固定部の強度は $0.5 \sim 2\text{N/mm}^2$, 根固め部の強度は $20 \sim 30\text{N/mm}^2$ であった。根固め部の範囲は GL-12.5m ~ 15.0m であり、それ以外は杭周固定部である。杭および根固め部の施工深さと地盤概要を図 13 に示す。地盤は GL-4.3m まで埋土, GL-4.3 ~ 7.0m は N 値が 4 程度の腐植土, GL-7.0m ~ 8.3m は N 値が 4 ~ 16 の砂質シルトとシルト質細砂, GL-8.9m ~ 13.1m は N 値が 19 ~ 43 の細砂, GL-13.1m ~ 16.1m は N 値が 13 ~ 17 の火山灰質粘性土である。根固め部の先端 (GL-15.0m) は、火山灰質粘性土層中にある。ポアホールソナーによる計測は、GL-10.0m, GL-11.0m, GL-12.0m, GL-13.0m, GL-13.5m の 5 深度にて行った。地上でのゾンデの設置状況を写真 1 に示す。計測深度位置と杭周固定部、根固め部の施工予定図を図 14 に示す。また、拡大根固め部の掘り出し状況を写真 2(a)(b) に示す。

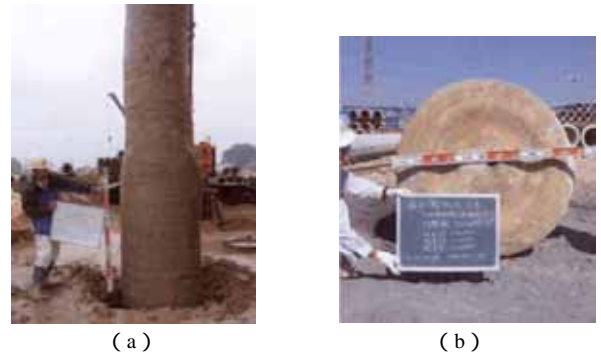


写真 2 拡大根固め部の掘り出し状況

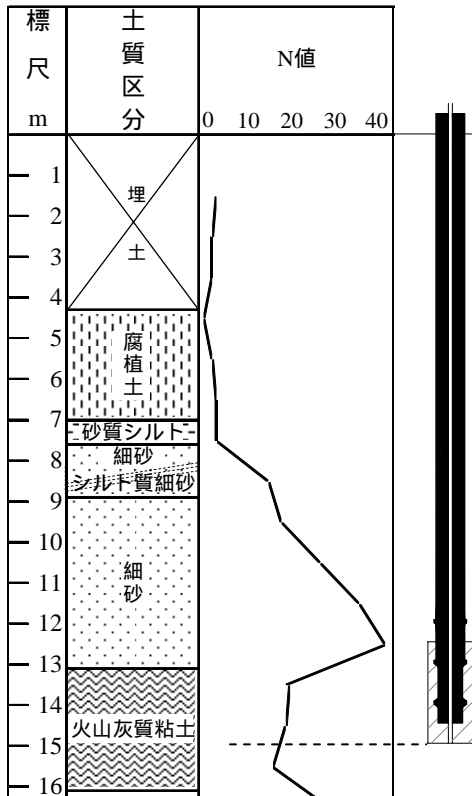


図 13 地盤概要と杭の埋設深度

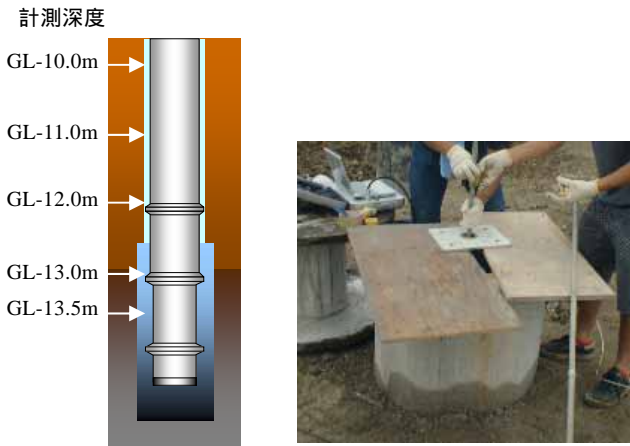


図 14 計測深度位置と実大杭の施工予定図

写真 1 地上でのゾンデ部設置状況

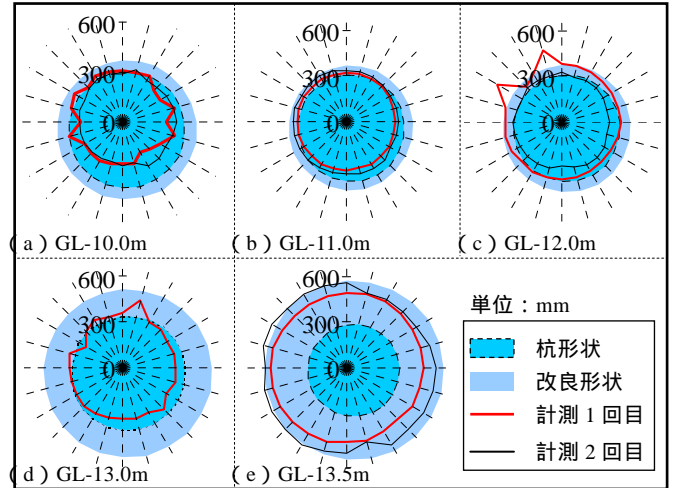


図 15 各深度における改良部の形状と反射波による推定形状の比較

5.2 実大根固め部の推定形状

図 15(a) ~ (e) は、各深度における杭周固定部の形状および根固め部の形状と 2 回の反射波の計測結果による推定形状の比較を示したものである。GL-10.0m, 11.0m, 12.0m の (a)(b)(c) では、推定形状が実形状より小さく現れており、杭の外形寸法と同等か幾分小さい。これは、杭周固定部の強度が小さいため、発振された波は杭周固定部には伝播されず、杭の外縁部で反射したことによるものと推察される。また、本試験杭は深度が浅い部分では測定孔が偏心していたこと、弾性波速度が遅かったことによる誤差が生じ、実形状よりも小さく評価してしまったと思われる。一方、GL-13.5m の位置においては、根固め部の寸法と反射波による寸法の平均誤差は 1 回目が 15%、2 回目が 6% の精度でとらえていた。しかし、GL-13.0m の位置では、反射波による寸法は実寸法よりかなり小さく現れていた。この位置は、図 14 に示すように根固め部と杭周固定部の断面変化部に相当し、乱反射による影響が原因と考えられる。図 16 は、各深度における同心円状の不連続位置を示したものであり、図 17 は先の図 11 に今回の実大杭におけるデータを追加したものである。これによると、今回のデータは、ほぼ先の模型試験体の関係曲線上にプロットされていることがわかる。これにより、実大杭においても、この関係曲線は適用でき、同心円状の不連続点の計測時間における変動係数から実大杭の形状寸法の変動係数を予測することが可能であるとわかった。

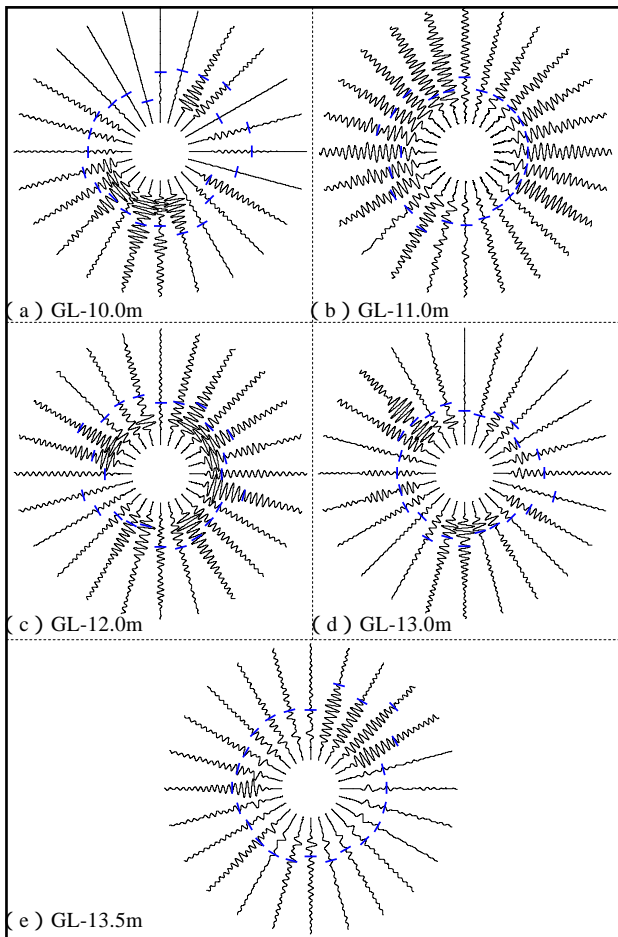


図 16 各深度における同心円状グラフと反射波の不連続点

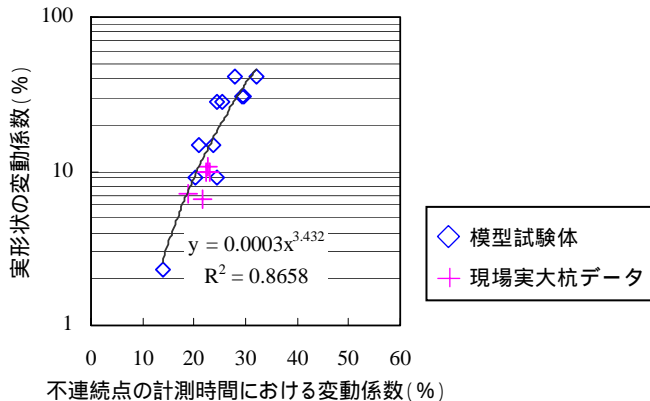


図 17 実形状と反射波の計測時間における変動係数

6. まとめ

本研究で得られた結論を箇条書きにまとめると、以下のようになる。

本測定法によると、平均誤差 3% ~ 27% の精度で、形状を評価することができた。

本実験で使用した試験体の範囲においては、根固め試験体の反射波を同心円状に並べることによって見出した不連続点の変動係数と実寸法の変動係数との間には、相関性の存在を見出すことができた。

杭周固定部では、固定液の強度が低いため波が伝播せず、杭の

外縁で波が反射することがわかった。また、これにより、根固め部と杭周固定部の境界位置をこの方法で評価することが可能である。

の関係は、実大杭についても適用可能である。

以上のように、本測定法を用いると、根固めの形状や寸法のばらつきなどを比較的明瞭にとらえることができるとわかった。また、計測上の注意点としては、測定孔はできるだけ杭の中心に設けることと発振子及び受振子を正確に圧着することが必要である。今後は、固化体の強度と波の伝播との有無をさらに明確にし、杭先端部形状の評価手法として発展させてゆくつもりである。

参考文献

- 1) 阿部 秋男・小野 日出男・福元 俊一・林 隆浩：非破壊試験を用いた埋込み杭に対する品質管理の一手法、土質工学研究発表講演集, Vol.28, pp.1861 ~ 1862, 1992.5
- 2) 小野 日出男・阿部 秋男・笹尾 光：長尺場所打ちコンクリート杭に対する非破壊試験結果、日本建築学会学術講演梗概集, Vol.1994, pp.1351 ~ 1352, 1994.7
- 3) 真野 英之・西尾 伸也・大槻 明・桐田 賢：杭の健全性調査におけるひび割れ位置推定法に関する一提案、地盤工学研究発表会発表梗概集, Vol.33, pp.1529 ~ 1530, 1998.5
- 4) 大和 真一・塚田 義明・重松 秀和・境 友明：ハイストレイン法による杭の拡底杭の形状推定、地盤工学研究発表会発表梗概集, Vol.33, pp.1519 ~ 1520, 1998.5
- 5) 小野 日出男・浅井 陽一・林 隆浩：場所打ちコンクリート杭の品質管理に対する非破壊試験法の適用性、地盤工学研究発表会発表梗概集, Vol.31, pp.1701 ~ 1702, 1996.5
- 6) 小野 日出男・阿部 秋男・林 隆浩・丸茂 文夫：超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質管理手法、地盤工学研究発表会発表梗概集, Vol.32, pp.1535 ~ 1536, 1997.5
- 7) 長瀧 慶明・八木下 修満：杭基礎のリユースに威力を発揮するパイルレーダー、建築技術, Vol.138 ~ 139, 2003.10