

ボアホールレーダによる地下構造調査事例

利岡 徹馬・山内 政也

Borehole radar measurements for investigation of
some underground structures

Tetsuma Toshioka and Masaya Yamauchi

Abstract

Underground constructions of structures are carried out quite often in urban area in Japan. There are a lot of existing underground structures, therefore, we have to take care of excavating underground not to damage the existing structures.

In order not to damage the existing underground structures, it is required to carry out surveys to detect the location of underground structures before construction. For that purpose, we have introduced borehole radar system which is utilized in boreholes drilled near the structures. The advantage of this system is that we can deploy the radar system quite near the structures, so that we can detect the location of the structures very precisely.

We have carried out several measurements with different borehole geometries and got good results. From the measurements, we could give feedbacks to the constructors for their construction plans.

キーワード：レーダ，ボアホール，地下構造物，杭

1. はじめに

首都圏を初めとする都市部を中心に，地下を利用したインフラの整備や再開発が活発に行われている。

例えば，都市部での治水を目的とした雨水管などは，地下数m～数十mの深度に施工され，近年は，ほとんどの場合，推進工法により施工される。また，比較的浅い深度に構造物を構築する場合でも，支持杭がある程度の深さまで施工するケースもある。

しかし，都市部においては，埋設管や地下鉄，道路や地下道などの地下構造物が既に多く存在している。また，地上構造物の杭や基礎などが地中深部にまで施工されているケースも多い。したがって，必然的に既存埋設構造物に対して近接した施工をすることになる。ここで，既存構造物と接触や干渉があると，既存構造物に影響を与え，場合によってはその損害は甚大なものとなりかねない。また，施工の進捗にも大きな影響を与え，工期の延長やコストの増大を余儀なくされる。そのため，新たに地下構造物を構築するにあたっては，これら，既存構造物の位置を事前に把握し，干渉しないように，注意深く設計・施工を行わなければならない。

このような状況において，設計にあたっての事前調査では，通常の地質調査のほかに，既存埋設構造物の位置を把握することが重要である。

本稿では，既存埋設構造物を把握する手法としての物理探査手法を用いた一例を紹介する。

2. 既存埋設構造物の把握におけるニーズ

既存埋設構造物に近接して新規構造物を設計・施工する際に，以下のような問題がしばしば発生する。

- 既往構造物の設計図（竣工図ではない）をもとに設計するため，現実には，設計図面とは異なる場所に既存埋設構造物が存在している可能性があり，しかも施工の段階でそれらが判明し，障害となる事例がある。
- 図面にはない（あるいは，はっきりしない）仮設部材などが，施工後もそのまま地中に放置されている事例があり，これらも施工の障害となる。
- 様々な既往構造物の配置がすでに過密になっていて，近接施工を余儀なくされる。

例えば，推進工法においては，予想しない位置に既存埋設構造物があった場合，シールドマシンをそれ以上前進させることができなくなり，多大なコストアップと工期の遅延を招くこととなる。また，既存のライフラインなどの想定位置に誤りがあり，工事によってそれに障害を与えた場合には，付近，あるいは広域の住民生活や生命に，多大な損害を与える可能性もある。

つまり、このような設計・施工の現場において、事前の調査が必要であるという以下のようなニーズがある。

- ・現に存在する既存埋設構造物の正確な位置を把握すること。
- ・その際には、高い位置決定精度を有すること。
- ・施工時のリスクを十分に小さくできるような、信頼性の高い調査結果および解釈結果を施工側に提供できること。
- ・全体の工事に占める事前調査工期やコストが、合理的な範囲にあること。

3. 新しい地下構造物調査手法（ボアホールレーダ探査）

3.1 ニーズに対応するための調査方法

2章で述べたように、このような地下構造物の調査では、比較的深い深度（数十m深）の既存埋設構造物を、精度良く調査することが求められる。もちろん、多数のボーリングを掘削して直接的に調査するような手法は、工期やコストの面からも現実的でないため、物理探査のような非破壊の探査手法が適用できることが望ましい。しかし、物理探査手法にはいくつかの手法があるが、地下レーダ探査のような高い空間分解能で探査できる手法では、逆に探査可能深度はせいぜい数mであり、逆に数十mの探査深度を確保できる探査手法（弾性波探査、電気探査など）では空間分解能が低く、求められる精度を満たすことは不可能である。

そこで、筆者らは、ボーリング孔を利用したボアホールレーダ探査を導入し、様々な地下構造物調査に適用することを試みてきた。ボアホールレーダ探査は、ボーリング孔が必要なため、完全な非破壊調査とはいえませんが、深い位置の構造物に対しても、レーダ探査の持つ高い分解能を生かした調査を実施することが可能である。

以下に、その手法の詳細について述べる。

3.2 ボアホールレーダ探査の概要

ボアホールレーダ探査は、ボーリング孔内に電磁波を発信・受信できるアンテナ（ボアホールアンテナ）を挿入し、ボーリング孔周辺の状況を探査する手法および装置である。図-1および表-1にシステムの概要を示す。

筆者らが使用しているボアホールアンテナ（TW-100）は、中心周波数100～400MHzのダイポールアンテナである。送受信一体型で、1本のアンテナで電磁波の送信、反射波の受信が可能である。アンテナ部は、直径37mm、長さ120cm、重さ2kgと軽量でコンパクトである。写真-1に、ボアホールアンテナの外観を示す。

さらに、電磁波の反射現象を利用した探査であるため、金属物以外でも、電磁波を反射するものであれば、その位置を捉えることが可能である。具体的には、鋼管杭や鋼製矢板のほか、コンクリート製の杭や埋設管などの構造物、空洞なども探査の対象とすることが可能である。

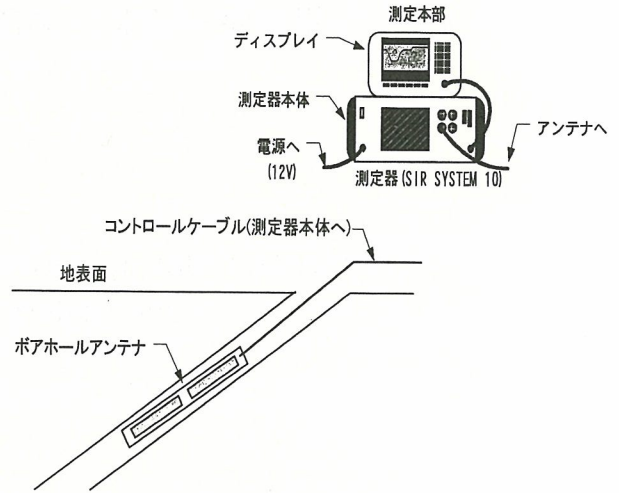


図-1 システム概要

Fig.1 Schematic of borehole radar system

表-1 システムの概要

Table 1 Specification of the system

測定器名	仕様
地下レーダシステム SIR System 10H (GSSI 社製)	分解能：20picoseconds 時間レンジ：4～10,000nsec A/D分解能：8,16bit A/Dサンプリング：256,512,1024,2048,4096 Scan rate：2～200scan/sec 接続可能チャンネル数：4 記録媒体：ハードディスク サイズ： Model CD-10A:30.5×29.2×21.6cm×10.5kg Model MF-10H:44.1×38.1×17.8cm×18.0kg
ボアホールアンテナ TUBEWAVE-100 (RADARTEAM社製)	中心周波数：100-400MHz 周波数帯域幅(3dB)：35-560MHz 耐圧：10気圧 ケーブル長：50m サイズ：直径37mm×長さ120cm 重さ：約2kg(ケーブル除く)

3.3 特徴および長所・短所

ボアホールレーダ探査の最大の特徴は、その探査記録により、ボーリング孔周辺の様子を可視化して表現することにある。すなわち、精度については十分吟味する必要があるものの、対象物の深度の情報とともに、ボーリング孔から対象物までの距離を求めることが可能である。また、筆者らが使用しているボアホールアンテナは、写真-1に示すように直径が37mmと小さく、通常のボーリング孔に挿入できるので（例えば、φ66mmのボーリング孔に、保孔のためのPVCパイプ（VP50）を設置した状態での測定が可能である）、ボアホールレーダを行うための専用のボーリング孔を設置することを必要としない。



写真-1 ボアホールアンテナ
Photo 1 Borehole antenna

以下に、使用しているボアホールレーダシステムの特徴を、長所・短所として整理する。

【長所】

- (1) 電磁波の反射を利用しているため、金属体以外の対象も探査できる。
- (2) 電磁波の反射時間を読み取ることで、対象物の深度がわかるだけでなく、ボーリング孔から反射体までの距離を推定できる。
- (3) 数百MHzの電磁波を利用した探査であり、他の検層手法に比べて、高い空間分解能を有した探査が可能である。
- (4) 現地で、探査記録を確認・処理することが可能であり、現場にて解析結果を得ることができる。

【短所】

- (1) 比抵抗が低い地盤では、探査範囲がボーリング孔から1m程度以内に限られる。
- (2) 特に、海岸付近で塩水が浸透している場合などは、電磁波の吸収・減衰が大きく、データを取得することが困難である。
- (3) 指向性がなく、1孔のボーリングで得られた記録のみから、ボーリング孔からどの方向に反射体があるのかを特定することができない。
- (4) 反射体が、具体的にどのような構造物であるかの特定は、反射パターンなどからの推定をするしかできない。

3.4 調査計画の策定方法

ボアホールレーダの調査計画を策定するにあたっては、

これまでに述べたような長所・短所を理解した上でニーズにマッチした結果を得られるように工夫する必要がある。

その方法は、ケース・バイ・ケースであり、一般論として述べることは難しいが、基本的な考え方を以下のとおりである。

【発注者のニーズの把握】

発注者ニーズの把握はたいへん重要である。特に、探査しようとする構造物や、これから施工しようとする構造物の構造、施工に不可欠な条件と必要な探査の精度、既存構造物と施工しようとする構造物の位置関係などを明確に認識しておく必要がある。ニーズを十分に理解した上で、過不足のない最適な調査計画を策定し、提案・実施することがたいへん重要である。

また、求められる精度や、施工時のリスク大きさによっては、ボアホールレーダ探査では対応できないケースや、他の手法を組合せなければならないケースもあり得る。このようなことも念頭において、ボアホールレーダ法の適用可否判断と他の代替手法の提案まで踏み込んだ調査手法策定が重要である。

【調査ターゲットの明確化】

既存埋設構造物調査といっても、いろいろなケースが考えられる。構造物全体の位置を把握するのか、部分的なある端面の位置だけがわかれば良いのか、正確な深度が必要か、シールドの掘進ルート上に既存埋設構造物がないことを確認できれば良いのか、など、調査のターゲット（結果として何を明らかにすれば良いか）を明確にしておく必要がある。

例えば、根入れなどの深度の情報だけが必要な場合であれば、往復反射時間や地盤の電磁波伝播速度の値はあまり重要ではない。ボアホールレーダ探査と組合せて実施されることの多い孔曲がり測定も不要となるだろう。このように、発注者ニーズを十分理解するとともに、探査対象（ターゲット）を明確にし、調査対象の焦点を絞り込むことで、より適切な調査を提案・実施できる。

【効率的な調査手順の検討】

例えば、あるシールドトンネルのルート選定が適切であることを確認しようとする場合、まず、予定ルート上の中心でボーリングを実施して、障害物がないことを直接確認する。次にこのボーリング孔でボアホールレーダを実施し、もし、ボーリング孔周辺に既存埋設構造物の反応があった場合には、その位置を特定するか、ルートの外にあることを証明できるように、ボアホールレーダの測定結果を確認しながら、順次、ボーリングの位置を決めて行くことが望ましい。

1孔の調査ごとに結果を確認し、その結果によって次の地点を決定していくような手順を前提に、考え得る結果を数パターン想定し、それぞれのパターンに対する調

査の進め方を事前に整理しておく必要がある。その際、ボーリングの本数を、できるだけ少なく抑えるなど、現場作業の効率性にも十分配慮する必要がある。

特に、前述のような“指向性がない”という短所をカバーするためには、少なくとも位置の異なる2つのボーリング孔を用いたボアホールレーダ調査により、同じ調査ターゲットを計測してその位置を特定する必要がある。このようなケースで、2孔目のボーリング孔の位置配置については、1孔目での測定が終わった段階で結果を検討し、それを踏まえて2孔目を設置して測定を実施するのが望ましい。

【確実な調査計画】

構造物とのクリアランスを確認する調査では、探査に使用するボーリング孔そのもので、最低限のクリアランスを直接確認するといった工夫も必要である。あるいは、ボアホールレーダ探査で埋設物の位置や深度を特定した後、ボーリング調査で、直接埋設物を確認することが必要となるケースもある。ただし、このような場合でも、まず、ボアホールレーダ探査を実施してあらかじめ調査ターゲット位置の絞込みを行うことで、不必要な調査ボーリング孔の設置をしないなどの効率化を計ることが可能である。

【正確な孔曲り測定】

ボアホールレーダ探査では、ボーリング孔と調査ターゲットとの相対的な位置関係から調査ターゲットの位置を求めることとなる。したがって、ボーリング孔の位置やその曲がり方を正確に把握しておくことが重要である。

後述する事例のうち、根入れ深度のみではなく埋設管や杭の位置を調査したものがそれに該当する。ボーリング孔が比較的浅い場合には、地表で孔口の位置を測量することで目的を達成できるが、深いボーリング孔を利用する場合、孔曲り測定を行ってボーリング孔の位置を把握しなければならない。

筆者らは、今回紹介する事例のいくつかで、Maxiborという測定器による孔曲り測定を実施し、その結果を利用した。

Maxiborは、プローブそのもののたわみを、内蔵されたカメラによって光学的に測定し、挿入されているボーリング孔の曲がり方を計測する装置である。プローブ内には、環状水準器と、ある間隔を置いて設置された2つの反射リングがあり、これらをCCDカメラで撮影して孔曲りを測定する。すなわち、2つのリングの中心が一致していればプローブ（ボーリング孔）は真直ぐであり、中心がずれている場合それだけプローブ（ボーリング孔）が曲がっているということになる。リングやカメラの位置は既知であるので、ズレの大きさから曲りの大きさを定量的に求めることが可能である。また水準器により、ゾンデの傾いている方向を特定することが可能である。図-2に、Maxiborの概要を示す。

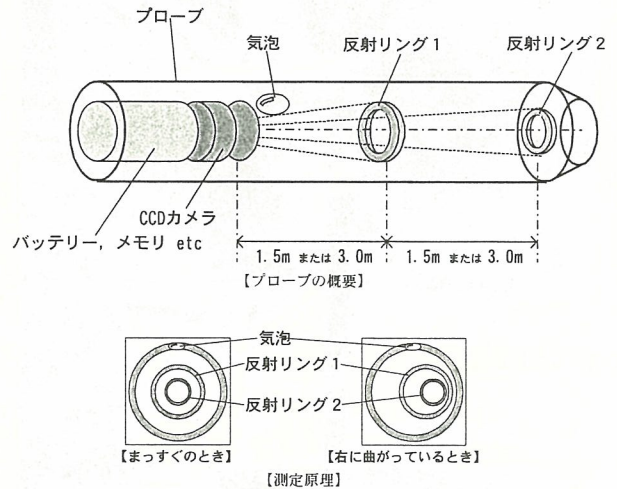


図-2 Maxiborの概要

Fig.2 Schematic of drift log of borehole called "Maxibor"

4. 調査事例

4.1 シールド工事に伴う杭の位置確認調査 (1)

この事例は、道路橋台下部に推進工法により埋設管を設置する際に実施したものである。図-3に調査概要図を示す。

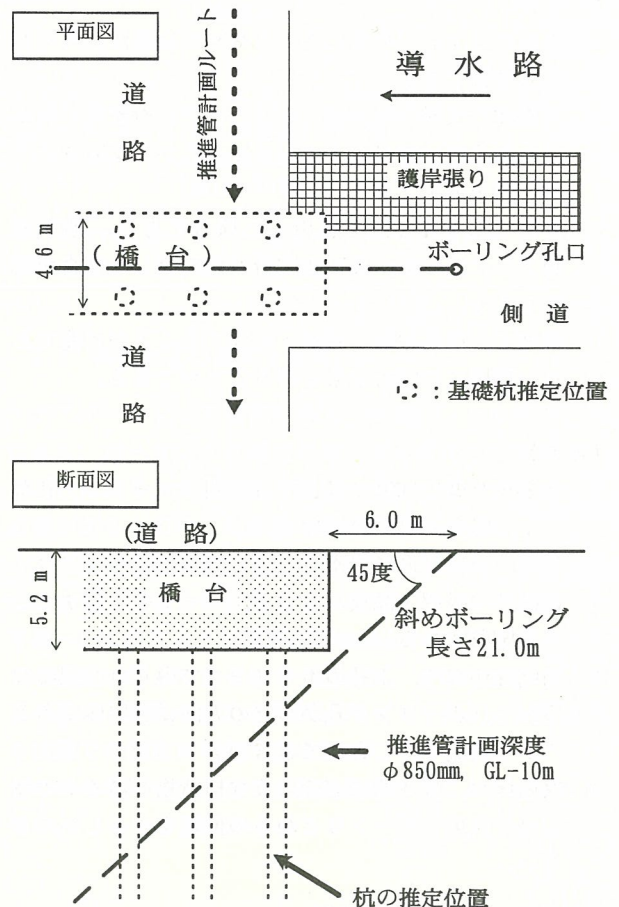


図-3 調査概要

Fig.3 Survey area and location of the borehole

橋台には支持杭が6本設置されている。それらの杭の並び位置および根入れ長さが約13m、直径500mmである鋼管杭であることは判っていたが、正確な基礎杭の位置や杭間距離は不明であり、推進工法による埋設管のルート検討に際して、杭の正確な位置を把握する必要があった。杭は、図-3に示すように、推進管のルートに直行する方向に2列施工されていることが分かっていたため、その間に、ルートと直交する方向に斜めボーリングを行い、ボアホールレーダ探査を実施した。

ボーリング孔は、斜め45度、長さ21.0mで、直径86mmのケーシング掘削を行なった後、孔壁保護のために塩ビパイプ（VP50）を挿入した。

周辺地盤は完新層の砂礫層および粘土層から成り、地下水位は、斜めボーリング孔掘削時の深度（斜距離）で約7m、すなわち地表から鉛直深度約5mであった。また、光学式の孔曲がり測定器（Maxibor）による孔曲がり測定の結果、ボーリング孔先端における孔曲がりは、ボーリング方向の左（杭基礎に近づく方向）に約5cm、上方に約25cmであった。

図-4に探査記録を示す。鋼管杭からの反射波と考えられる双曲線型の反射パターンが認められる。反射パターンの頂点の位置が基礎杭の中心位置と考えられ、その位置は、-10.1m、-12.6m、-15.2m、-17.4mの4箇所が明瞭である。この他に、孔底の-20mにも双曲線状の反射パターンがやや不明瞭ではあるが認められる（孔底のため記録の右半分しか識別できない）。

推定される基礎杭中心間隔は、ボーリング孔沿いで2.2m~2.6m間隔であり、水平方向に換算すると1.6~1.8mとなる。最大間隔となる2.6mを用いると、

- 推定される基礎杭の中心位置の間隔（水平距離）
 $2.6m \times \cos 45^\circ = 1.84m$
- 杭の直径を500mmとした場合の杭間距離
 $1.84m - 0.5m = 1.34m$

と求められる。この結果、計画されていた推進工法の埋設管は、鞘管外径860mm、最小離隔300mmとされていたため、

$$(鞘管外径860mm) + (最小離隔300mm) \times 2 = 1460mm$$

$$> 杭間距離1340mm$$

となり、この橋台の下では、推進不可能と判断された。もし、事前調査を行わず、設計図面のみをもとに掘進可能という判断をした場合には、施工中に重大な事故につながっていた可能性があった。

4.2 シールド工事に伴う杭の位置確認調査 (2)

この事例も、4.1と同様に、シールド工事に伴ってルート沿いにある鋼管杭の位置を調査したものである。道路陸橋に沿って、地下およそ15mの位置に推進工法による雨水管の施工が計画されており、橋脚基礎の鋼管杭の間を通すルートが選定されていた。しかし、杭の竣工図がなく、杭の実際の位置を把握した上で、杭に交差しないルートを設定する必要があった。雨水管の施工は、設計図をもとにしたルート計画ですでに開始されていたが、施工者の判断で事前に実際の杭に位置を確認することとなった。探査対象は、直径約500mmの鋼管杭であった。そこで、陸橋のすべての橋台、橋脚について、ボアホールレーダを用いた調査を実施した。

調査は、それぞれの橋台、橋脚について、ボーリング（斜め約70度）を行い、ボアホールレーダによる探査を実施した。また、以下に述べるように、本例では、ボーリング孔と鋼管杭との距離が重要な要素となるため、全孔において光学式の孔曲がり測定器（Maxibor）による孔曲がり測定を実施し、調査結果に反映させた。設計図によると、杭の配置は雨水管のルートに対して横に4列（1列は4本）であった。また用地の制約上、4.1の事例のように、橋台や橋脚の横から、ルートに直交する方向のボーリングを実施することはできなかった。そこで、ルート縦断方向に斜めボーリングを実施して、ルート周辺の杭の位置を推定し、ルート選定のための資料とすることとした。さらに、ボーリング孔から杭までの距離と方向（左右どちら側にあるか）が重要となることや、万が一、シールドマシンが杭に干渉した場合の損害の大きさも鑑み、シールドマシンの掘進ルートの中心と左右側

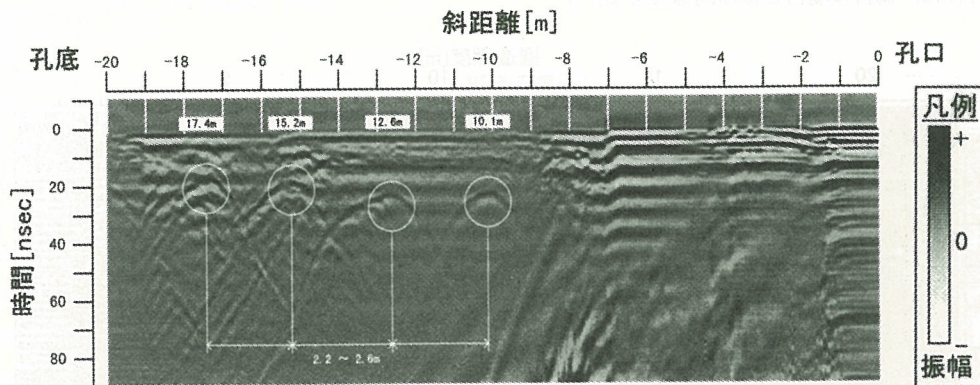


図-4 探査記録

Fig.4 Result of the survey

面位置上でのボアホールレーダ調査を基本とした。このような方法を用いることで、シールドマシンセンターと両側面位置については、ボーリングにより直接、障害物の有無を確認することができる。施工される雨水管の直径は約2m、すなわち、隣り合うボーリング孔間の距離は1mであり、センターと側面の探査記録を比較することで、検出された杭が側面のボーリング孔のセンター側にあるか、外側にあるかを判断することができる。このような探査を、すべての橋脚、橋台について実施した。

周辺地盤は、完新層の砂層および粘土層からなり、GL-5~10m付近には砂礫層が分布し、地下水位はGL-2m程度である。以下に、代表的なデータを2例紹介する。

まず、橋台における探査事例を示す。図-5に、調査概要図を示す。ボーリング孔は水平からの傾斜約70度、長さ22mであり、すでに述べたように、側面のボーリング孔に沿って4本の鋼管杭が想定された。

図-6に探査記録を示す。側面位置のボーリング孔における探査結果である。探査記録の横軸はボーリング孔沿いの掘進深度、縦軸の目盛りは反射時間から換算したボーリング孔からの概略距離である。杭による反射と考えられる双曲線状のパターンが、掘進深度20m、16m、13m、10mの4箇所に認められた。10m付近は、砂礫層のため記録に乱れが見られるが、杭によるものと思われる反射波が検出できた。また、4本の杭は、既往図面では直線上に並んだ配置となっていたが、ボアホールレーダの探査結果ではボーリング孔からの距離が異なることも判明した。センター位置での探査では、このような明瞭な反射パターンは認められなかったため、これらは、計画ルートの外側にあると判断した。また、往復反射時間からボーリング孔からの距離を換算した。ここで求めた距離は、設定する電磁波速度によって大きく異なるため、大きめの誤差を想定したが、それでも、シールドマシンとのクリアランスは十分に確保できると想定された。

つぎに、橋脚における探査事例を示す。図-7は調査の概要図である。平面的な位置関係は、図-5と同様である。調査の内容は、橋台の場合とほぼ同様である。ボー

リング孔は水平からの傾斜約70度、長さ23mである。既往資料から、橋台の事例と同様、4本の鋼管杭が想定された。

図-8に、側面位置での探査記録を示す。杭による反射と考えられる双曲線状のパターンが、掘進深度20m、17m、13m、9mの4箇所に認められた。ここでも、橋台の場合と同様、センター位置の記録を併せて検討し、

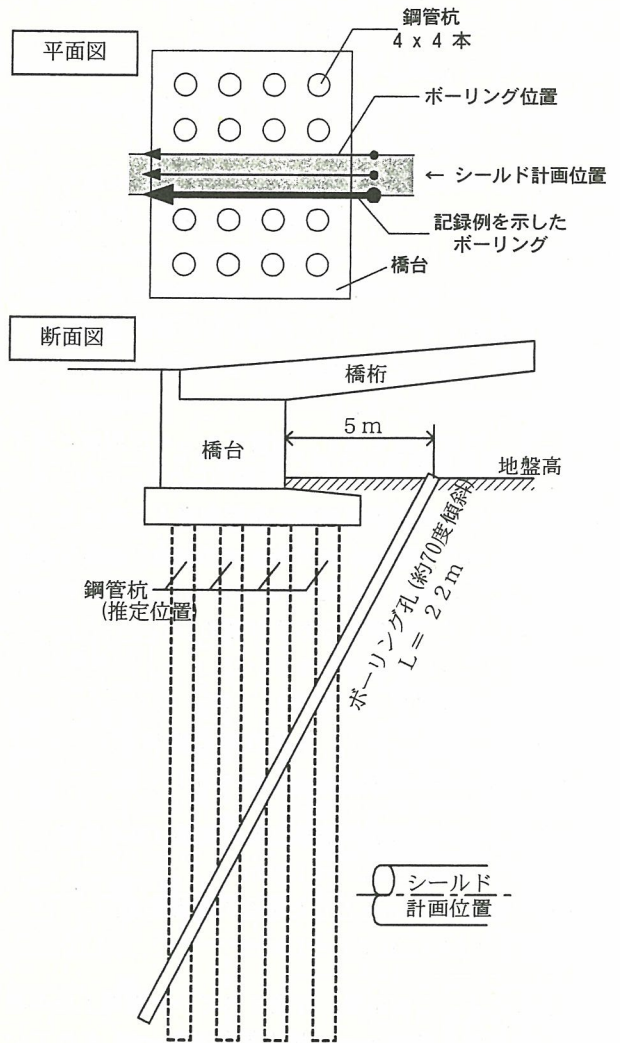


図-5 調査概要
Fig.5 Survey plan and location of borehole

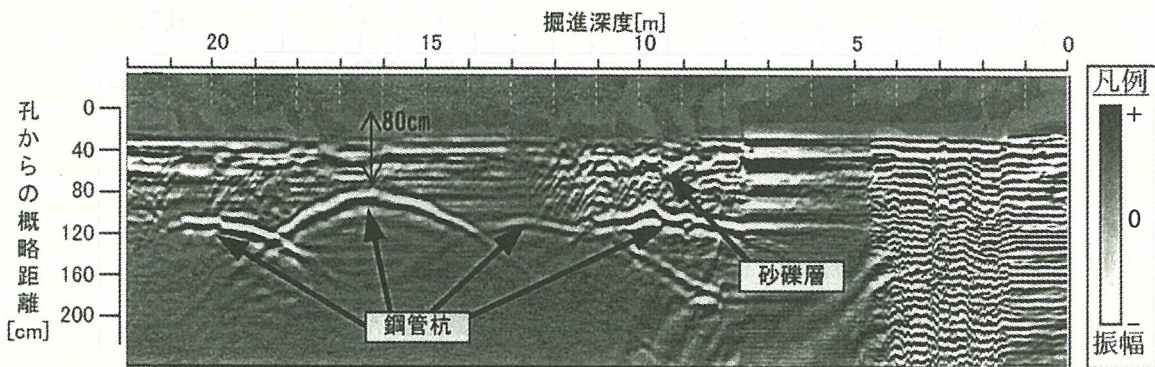


図-6 橋台における探査記録
Fig.6 Result of the survey for bridge pier

ルート上には十分なクリアランスが確保できているものと判断した。

このように、ボアホールレーダ探査結果をもとに、各橋台、橋脚の杭の位置を把握し、ルート決定のための資料とすることができた。その後、調査結果に基づいてルートを修正し、掘進作業が進められたが、杭に接触・干渉することなく陸橋下の掘進を完了することができた。

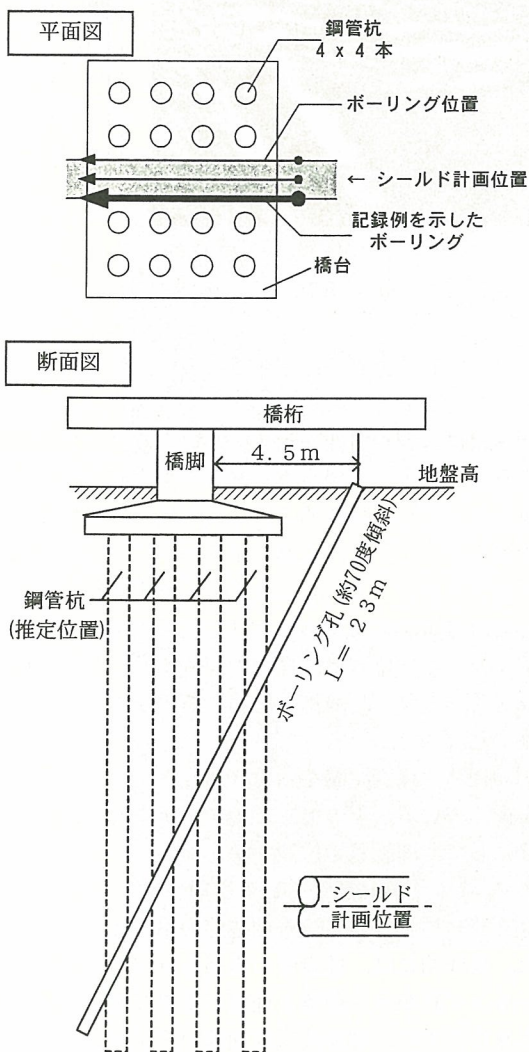


図-7 橋脚の測定概要図
Fig.7 Survey plan for bridge pier

4.3 矢板の根入れ深度調査

ここでは、矢板の根入れ深度調査に適用した事例を紹介する。

既存の杭や矢板の根入れ深度を把握することは、その構造物の改修などの設計をする際の基礎データや、近接施工（杭先端直下で推進工法による施工が計画されている場合など）に際しての情報として必要とされることが多い。

ここで紹介する事例は、河川改修工事にともない、既存の止水用鋼矢板の長さ（根入れ深度）を調査したものである。図-9に、調査概要図を示す。このように、護岸部に施工されている止水用鋼矢板の長さを調査することが直接の目的であった。矢板の位置は判っていたため、近接して鉛直ボーリングを行いボアホールレーダ探査を実施した。矢板の長さは、おおよそ10m程度と推定されていたため、ボーリングの掘進長は15mとした。

周辺の地盤は砂層および粘土層である。なお、河川の護岸であり、海水の影響は心配されなかった。

図-10に探査記録を示す。深度2m付近までは、護岸コンクリートの影響を受けた記録となっているが、深度

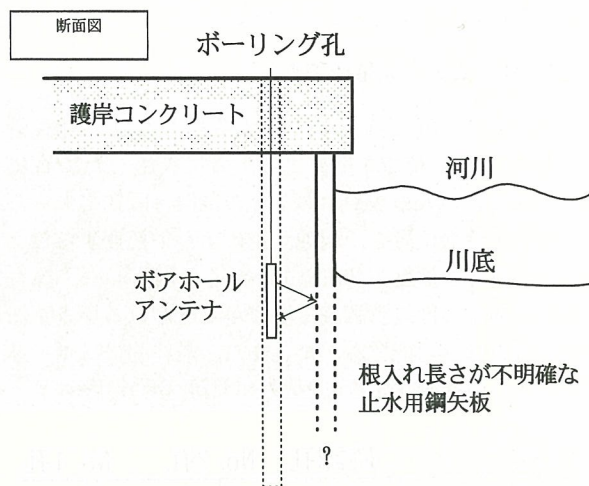


図-9 調査概要
Fig.9 Survey plan for detecting the length of steel sheet pile

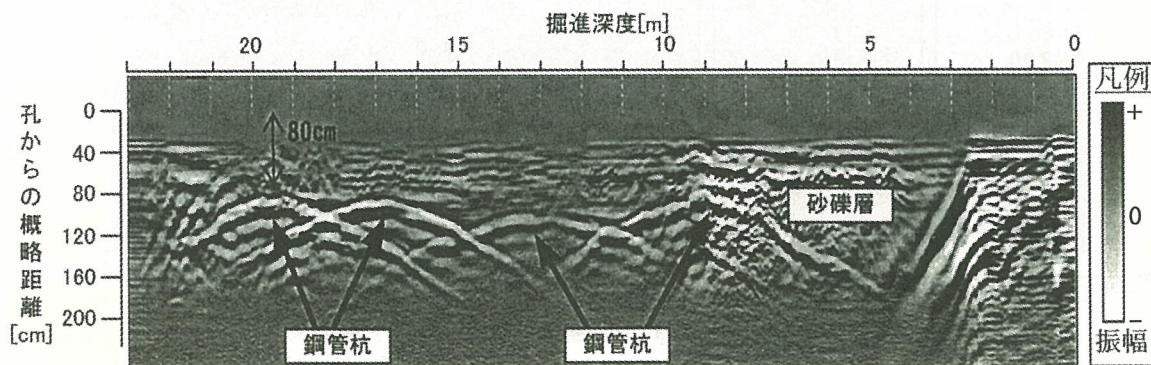


図-8 橋脚における探査記録
Fig.8 Result of the survey for bridge pier

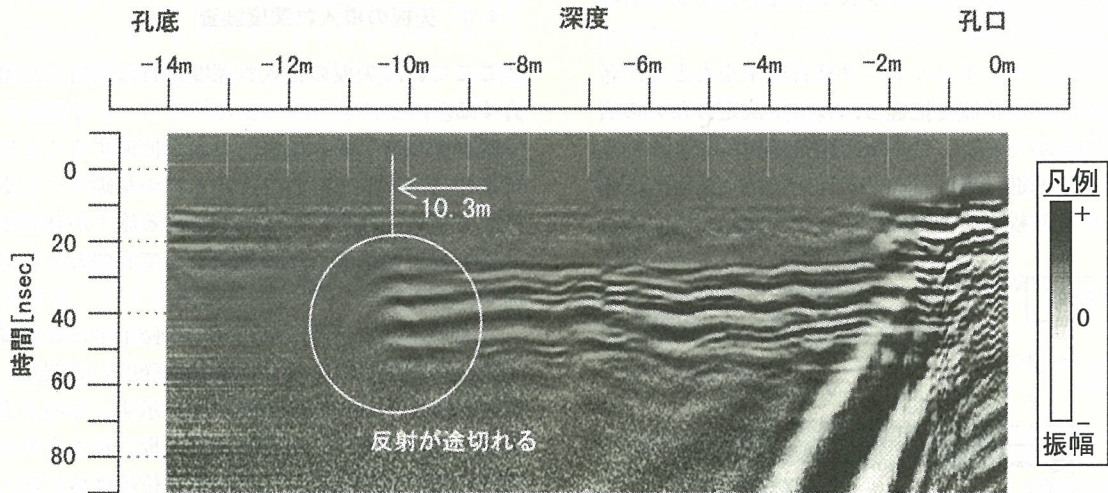


図-10 探査記録
Fig.10 Result of the survey for steel sheet pile

2.5~10mの区間には、直線的に連続した強い反射波が、明瞭に捉えられている。この連続した反射が、矢板によるものと考えられ、深度10mを越えた所で途切れており、それ以深では、明瞭な反射波は認められない。この記録で、反射波の途切れた深度を読取ることにより、鋼矢板の長さを10.3mと推定することができた。

4.4 埋設管の位置確認調査(1)

この事例は、近接施工を実施するにあたり、埋設管(暗渠)の正確な位置を把握するために実施した調査である。埋設管の大きさやおおよその位置は既知であったが、より正確な位置を、現地測定によって把握することが求められた。深度が10m以上と深く、地下レーダ探査などの、通常の埋設管調査で地表から行われる探査手法では、調査は不可能であった。また、最終的にはボーリングにより直接確認することとなったが、ポアホールレー

ダにより正確な位置を測定することで、効率的に調査を進めることができた。

図-11に、調査概要を示す。このように、想定される埋設管を挟むように鉛直ボーリングを実施し、埋設管の位置を特定した。具体的には、向かって右側に埋設管との距離を変えて2孔、左側に1孔のボーリングを実施して探査を実施し、これらの結果から推定された埋設管の中心で直接確認のためのボーリングを実施した。また、各ボーリングの位置は、探査を実施するごとに、現地で記録をチェックし、最適と思われる箇所を選定しながら実施した。

図-12に、探査記録を示す。各孔とも、埋設管の反射波を捉えている。そこで、このデータをもとに、以下のようにして、埋設管の位置を決定した。

まず、No.1孔に認められる反射パターンから、解析プログラムにより当該調査地地盤の電磁波透過速度を求めた。具体的には、埋設管の直径を既知の値として与え、ボーリング孔からの距離と地盤の電磁波速度を様々に変化させたときの、理論的な双曲線のパターンを計算し、探査記録にもっともフィットするものを求めた。その結果、電磁波伝播速度は4.5cm/nsec (ナノセカンド: 10⁻⁹秒)と算出された。

図-13は、各孔の埋設管からの反射パターンを拡大して示したものである。

図-13に示すように、No.1孔と埋設管のパターンまでの往復反射時間は44.5nsecであるので、No.1孔と埋設管の最短距離は、

$$44.5/2 \times 4.5 = 100.1 \text{ (cm)}$$

と求められる。同様に、No.2孔の往復反射時間は、5.2nsecであり、埋設管との距離は

$$5.2/2 \times 4.5 = 11.7 \text{ (cm)}$$

と求められる。No.1孔とNo.2孔の孔間距離は90cmで

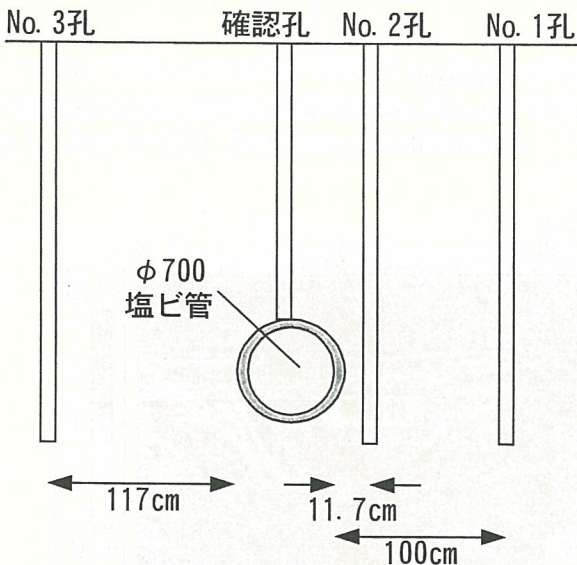


図-11 調査概要
Fig.11 Survey plan for detecting the buried pipe

あり、わずかに誤差が認められるものの、上記で求めた電磁波伝播速度が正しい値であることを確認した。なお、No.1孔およびNo.2孔における往復反射時間と孔間距離(90cm)を比較すると、これらの孔間に埋設管が存在することは有り得ない。

また、No.3孔と埋設管の位置関係については、解析プログラムにより当該調査地地盤の電磁波透過速度を求めた結果、3.4cm/nsecと算出された。図-13に示すと

おり、No.3孔と埋設管による反射パターンの往復反射時間は68.8nsecであることから、No.3孔と埋設管の最短距離は

$$68.8/2 \times 3.4 = 117 \text{ (cm)}$$

と求められた。埋設管を確認したボーリング孔とNo.3孔の孔間距離は150cmであり、確認孔は塩ビ管のほぼ中心にあるものと推定された。

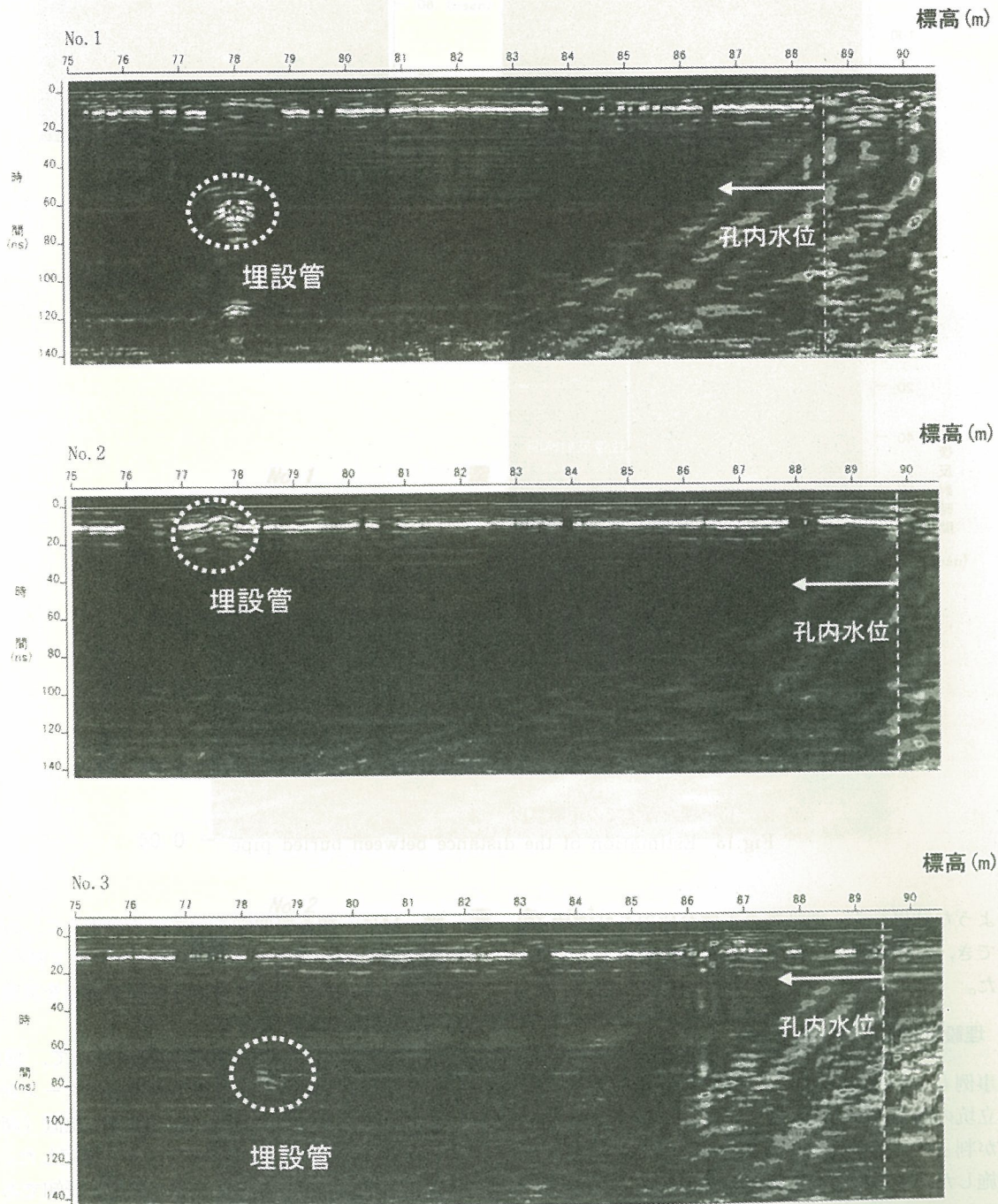


図-12 探査記録

Fig.12 Result of the survey for buried pipe

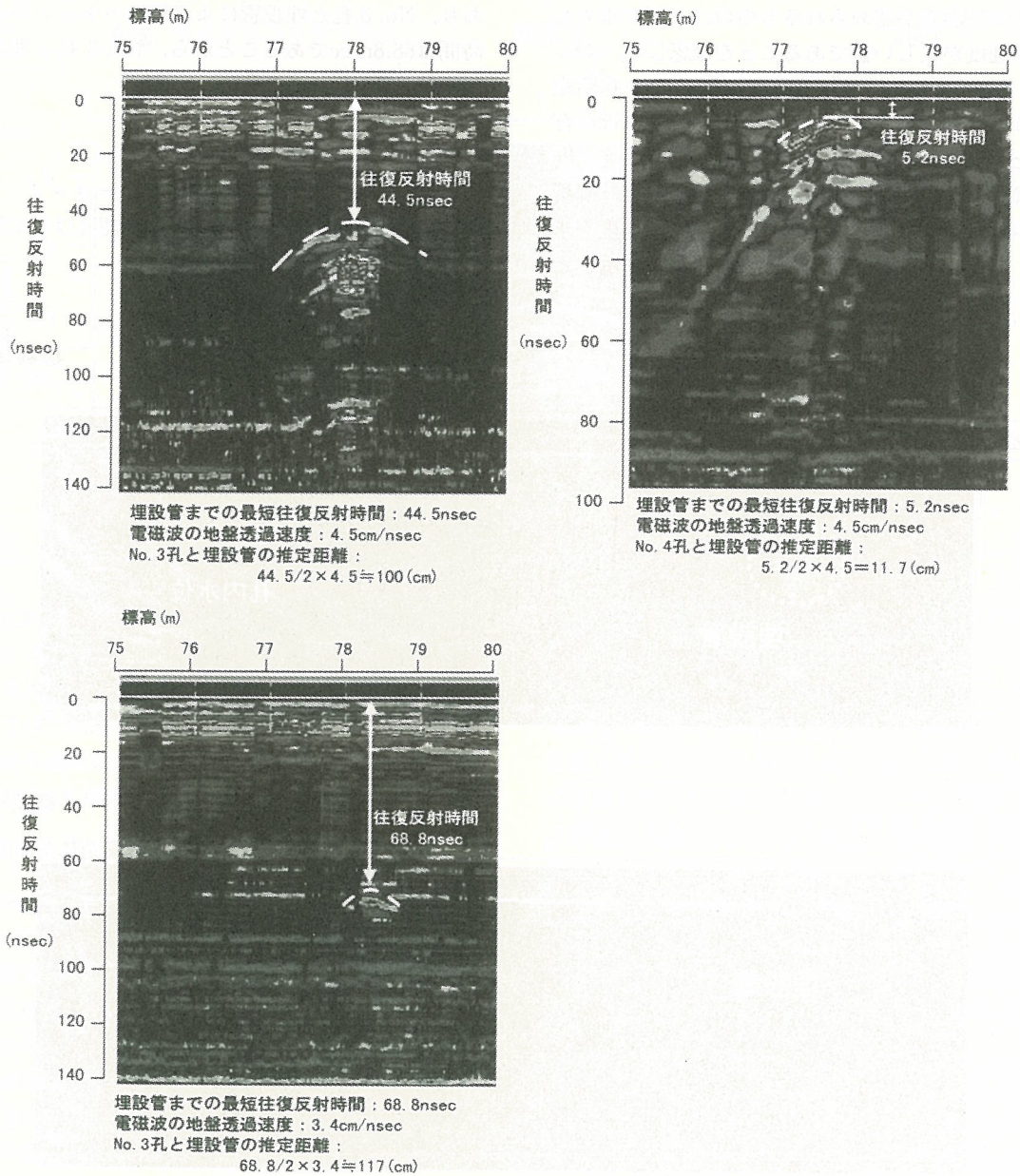


図-13 埋設管までの距離算出

Fig.13 Estimation of the distance between buried pipe

このような結果から、埋設管の正確な位置を特定することができ、この結果は、施工計画の基礎資料として利用された。

4.5 埋設管の位置確認調査 (2)

この事例も、4.4 同様の埋設管の位置確認調査事例である。立坑の施工予定箇所付近に埋設管が敷設されていることが判っていたため、その位置を特定するために調査を実施した。埋設管のおおよその位置は判っていたが、深度が3mであり、地表からの地下レーダ探査では、反射波を捉えられないか、あるいは十分な品質のデータの取得が困難であると考えられた。そこで、想定される埋設管を挟むようにして2本のボーリング孔を掘削し、ボアホールレーダ探査を実施した。

図-14に、調査概要図を示す。このように、φ800mmの埋設管を1.5m離れた2本のボーリングで挟みそれぞれのボーリング孔でボアホールレーダ探査を実施した。図-15に探査記録を示す。

No. 1, No. 2の2孔の探査記録において、埋設管からのものと考えられる双曲線上の反射パターンが明瞭に現れている。この反射パターンの頂点の位置(深度)から、埋設管の中心深度は2.9mであると推定した。また、埋設管の直径とボーリング孔間の距離が既知であることから、埋設管からの反射時間を読み取り、以下により電磁波伝播速度を算出した。

$$(150-80)/(No. 1の反射時間+No. 2の反射時間)/2 = 5.3cm/nsec$$

さらに、この値と往復反射時間から、各ボーリング孔と埋設管との距離は、No.1-埋設管間で50cm, No.2-埋設管間で20cmと推定し、埋設管の正確な位置を特定した。

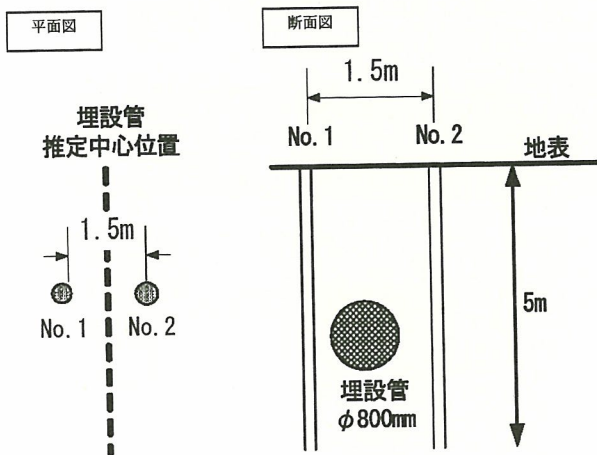


図-14 調査概要図
Fig.14 Survey plan for buried pipe

5. 今後の展開と課題

筆者らは、装置を導入して以来、ボアホールレーダ探査を、様々な地中構造物調査へ適用してきた。そのほとんどは、シールドトンネルを中心とした、地下構造物の新設に伴い、近接した既往構造物の位置などを確認する内容のものであった。その対象は、杭の位置、杭の根入れ、躯体の底面位置、埋設管の位置・深度などである。また、ほとんどの場合、高精度の調査結果が発注者側から求められた。これに対して、調査手順や方法を工夫し、発注者のニーズにマッチした調査結果を得ることができたと考えている。

今後も、特に都市部では、地下における様々な開発が進んで行くと考えられることから、同様のニーズは存在するものと考えられ、ボアホールレーダ探査を活用する機会は増えていくものと考えている。

しかし、その一方で、以下のような課題については完全に解決できているわけではない。

- ボーリング孔の削孔を伴うため、作業時間および調査経費が高くなってしまふ。
- 施工上、非常に高精度の調査を要求されることが多

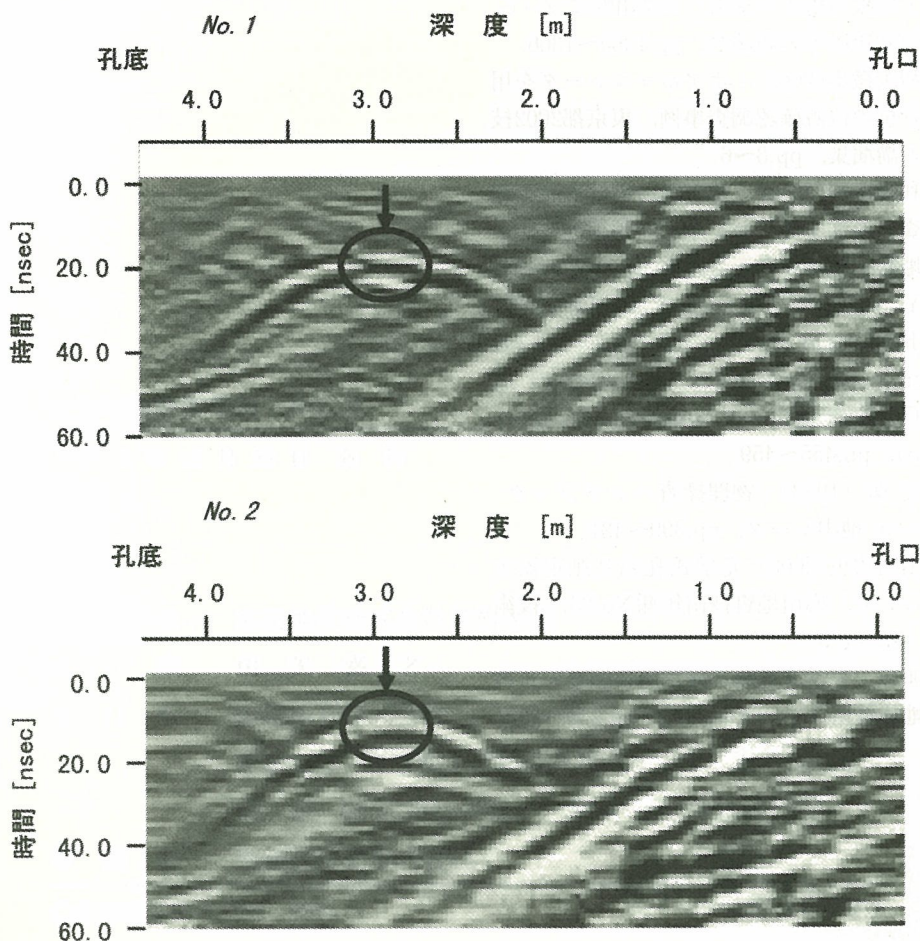


図-15 探査記録図
Fig.15 Result of the survey for buried pipe

く、発注者側の全ての要望に応えられているとは、必ずしも言えない。

上記課題に対しては、探査手法の原理上、手法そのものの機能向上には限界があるものの調査ボーリング孔の配置を幾何学的な観点から工夫することにより、最小限のボーリング孔で、多くの情報が得られるようにすることで対応したいと考えている。

本稿では、いくつかの制約条件があるなかで、調査ボーリング孔の配置をいろいろと工夫した実例を紹介した。このような工夫で、事前調査としてボアホールレーダ調査法が実用的なものとして適用できると考えている。今後は、より多くの調査でボアホールレーダを提案し、実績と経験を積むとともに、これまでの経験と現状に対する課題を踏まえ、よりニーズにマッチした既存埋設構造物調査法を提案していきたい。

参 考 文 献

- 1) 利岡徹馬 他(2001)：ボアホールレーダによる橋台基礎杭の探査例，物理探査学会第104回学術講演発表会論文集，pp.229～233.
- 2) 斎藤秀樹，利岡徹馬，山下善弘(2002)：ボアホールレーダの杭・矢板の根入れ探査への適用性について，土木学会第57回年次学術講演会，pp.1365～1366.
- 3) 山内政也，利岡徹馬(2002)：ボアホールレーダを用いた既存鋼管杭の位置確認調査事例，東京都2002技術フォーラム講演集，pp.3～6.
- 4) 山下善弘，利岡徹馬(2003)：都市域における既存地下構造物調査へのボアホールレーダの適用性について，第38回地盤工学研究発表会講演集，pp.59～60.
- 5) Yoshihiro Yamashita, Tetsuma Toshioka(2003), Single borehole radar imaging of buried objects in civil engineering application, Proceedings of the 6th SEGJ International Symposium(January 2003, Tokyo), pp.455～459.
- 6) 物理探査学会 編 (1998)：物理探査ハンドブック 手法編，第7章 地中レーダ，pp.399～421.
- 7) 石川貴規，山内政也(2003)：光学式孔曲り測定器の適用精度について，応用地質技術年報No.23，技術ノート，pp.123～129.
- 8) 石川貴規(2001)：光学式孔曲り測定器の概要とその適用例，全地連技術フォーラム2001，pp.229～233.