

地中探査

A. 地 中 レ ー ダ ー

B. ボアホールレーダ探査

C. 磁 気 検 層

(構造物基礎杭根入れ調査)

1. 地中レーダ探査

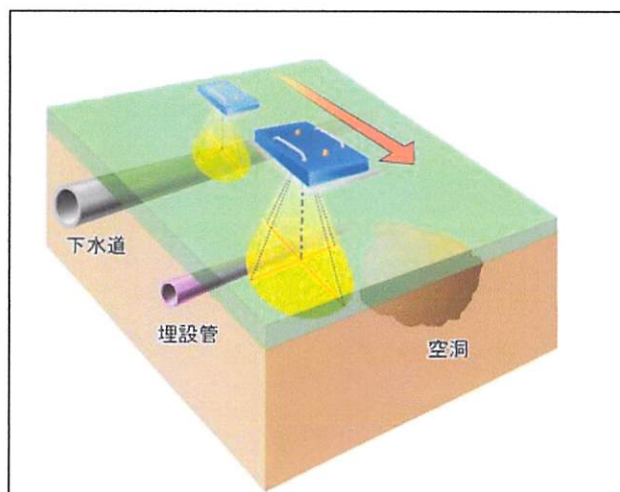
1.1 探査の目的

地中レーダ探査は、アンテナを走査することにより、容易に地中の情報を迅速に非破壊で得ることの出来る探査方法である。

主な目的

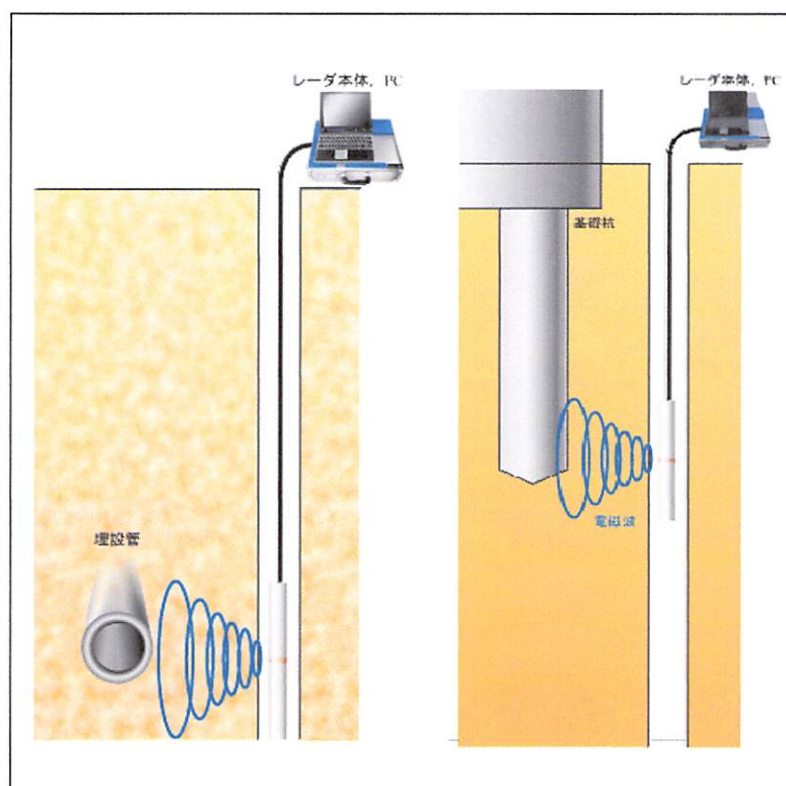
- ・地盤空洞、ゆるみ
- ・トンネルのコンクリート厚、背面の空洞
- ・既設の埋設管(埋設物)の位置、深度
- ・構造物の配筋
- ・遺跡調査

などが探査可能である。



また、右図の様にアンテナをボーリング孔に挿入出来るよう改良することにより、深部の埋設管の位置や既設構造物の杭の根入れ深度を把握する事も可能である。

(18 ページ以降)



1.2 アンテナ性能

レーダとは、電磁波を地中に送って調べるため、目的とする地盤などの電磁波の伝わりやすさ、伝わりにくさで探査深度が決まってくる。周波数の異なるアンテナの探査範囲と探査目的を以下の表に示す。

アンテナ周波数(メーカー)	最大探査深度	探 査 目 的
200MHz (KOMATSU)	2.0~2.5m	地下空洞、埋設管(埋設物)、遺跡
350MHz (KODEN)	1.5~2.5m	地下空洞、埋設管(埋設物)、遺跡
400MHz (KOMATSU)	1.5~2.0m	地下空洞、コンクリート背面、埋設管、遺跡
800MHz (KOMATSU)	0.5~2.0m	コンクリート背面、配筋
1500MHz (KOMATSU)	0.2~0.5m	配筋

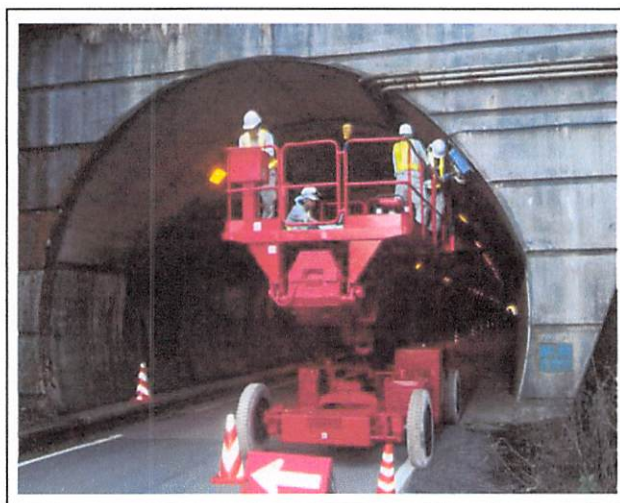
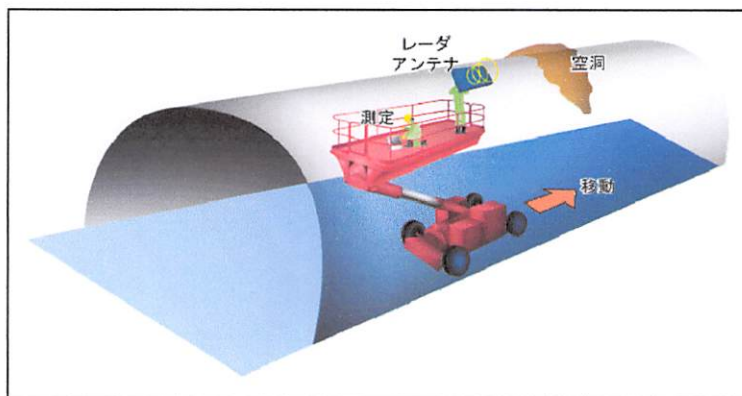
1.3 トンネルレーダ探査(導水路レーダ探査)

近年、トンネル覆工コンクリートの健全度調査が重要となっている。特に30～40年前の高度成長期に施工されたトンネルの変状が顕著になりつつある。

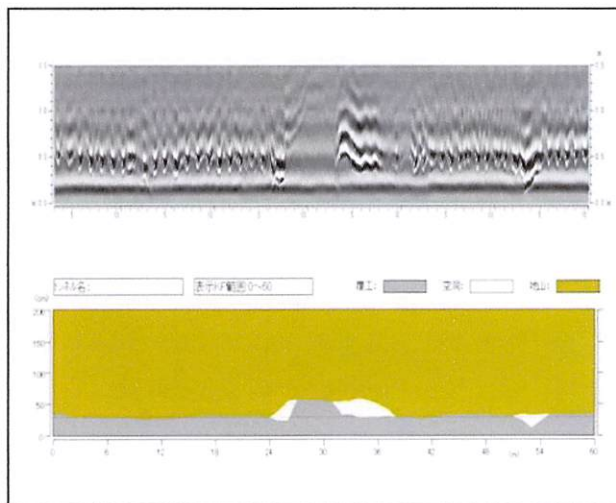
現状の NATM 工法以前のトンネル施工法としては在来工法（矢板工法）であり、掘削後覆工コンクリートを打設する際、上半部（特に天端部）につ

いては矢板の存在等によりコンクリート注入がしにくく、空洞が存在することが十分にある。その調査法として非破壊で行うレーダ探査が適用される。

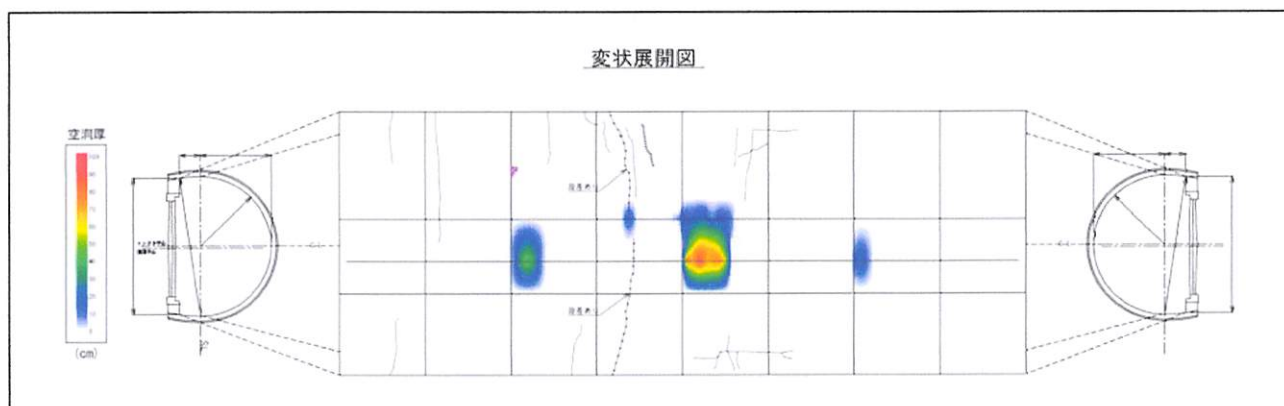
本調査を実施する際はレーダ探査終了後、空洞と判断される位置において削孔(コア抜き又はハンマードリル)での空洞確認調査を行い、空洞ボリューム計算のキャリブレーション(校正値)に用いることが望ましい。



現場状況



レーダ画像及び解析結果



空洞分布展開図

2. 測定及び解析方法

2.1 地中レーダの原理

レーダ探査は、電氣的性質の異なる物質からの反射波を利用して地下構造を探索する手法である。図-2.1 の様にアンテナから地下に向けて発射された電磁波（電波）が、伝搬媒体となる土や地層と電氣的性質の異なる物質にあたって反射する。その反射波が、再び地表に出て受振アンテナに到達するとき、その往復時間から、反射物体までの距離（深度）を求め、アンテナを地表面で移動することにより、平面上の位置が求まる。例えば埋設管、空洞、地下水などの反射物体、または地層の境界面等を二次元の断面図で表わすことができる。

レーダ探査は、地下の浅い部分を高い分解能で探索することを目的とするため、パルス幅のきわめて短い数 ns (ns(ナノ秒)=10 億分の 1 秒) のパルス送信波が必要とされる。

本装置のアンテナは、電磁波を地下にのみ放射し、空中へは放射しないように、シールドなどの処置が施されている。

大地の比誘電率を ϵ_r とすると、空気中の電磁波の伝搬速度が $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ なので、地下における電磁波の速度 V は、

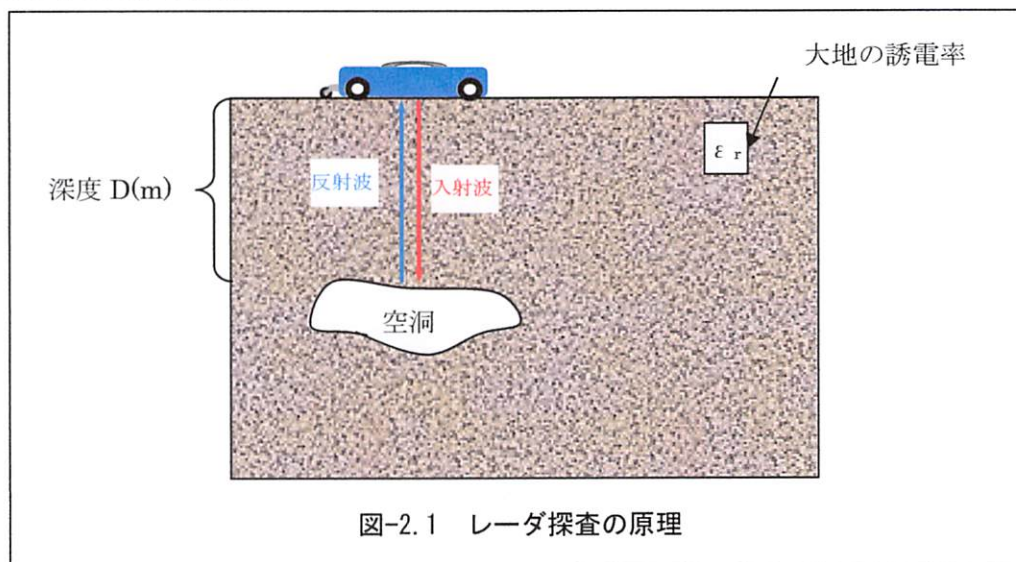
$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} \cdots \cdots \cdots \text{式-2.1}$$

で求められる。

反射物体までの距離 D は、送信時刻と反射波の受信時刻の時間差 T から、

$$D = \frac{1}{2} V \cdot T \quad (\text{m}) \cdots \cdots \cdots \text{式-2.2}$$

の式で求めることができる。



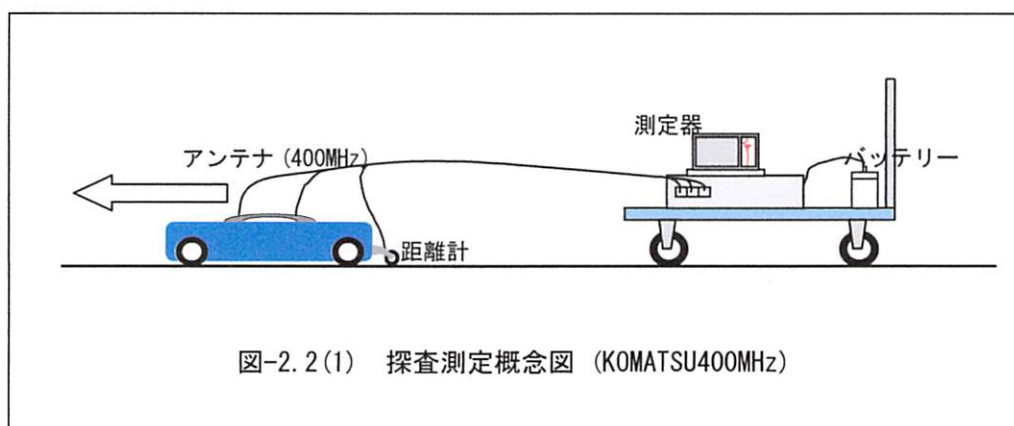
2.2 地中レーダ測定方法

測定対象となる地盤上に、ほぼ直線になるように測線を設ける。その際、探査目的とする物体の分布状況が分からない場合や、広い範囲を対象とする場合には一定間隔に測線をメッシュに配置する。また、対象物が埋設管などである程度の既存のデータがある場合は、その管上を直交するように測線を配置する。測定中にアンテナが地盤と密着するように、なるべく平坦な場所が望ましい。

アンテナを測定地盤上の地表面に置いて、ゲインの調整を行う。アンテナを動かしながら、測定器のディスプレイにあらわれる反射波形、反射画像を参考に何度か繰り返し適正ゲインに設定する。

マークしておいた測線の始点にアンテナの中心がくるように、アンテナを地表面にセットする。測線上を終点側にアンテナをゆっくり走査して行く。終点のマークにアンテナの中心が来たところで測定を終了する。

図-2.2(1)～(2)にレーダ探査の概念を示す。



レーダ探査装置の機器一覧を表-2.1, 表-2.2 に示す。

表-2.1 多目的レーダシステム 機器一覧

項目	多目的レーダシステム (MGPR-10)	コマツ エンジニアリング(株)
アンテナ	200, 400, 800MHz, 1500MHz	
AD コンバータ分解能	12bit	
データビット長	16bit	
平均処理回数	256 回 (可変)	
時間レンジ	10, 20, 30, 60, 120, 240 (切替式)	
データ記録媒体	RAM→ハードディスク※(1)	
通信ケーブル長	6, 12m (無線による遠隔受信可)	
画像表示階調	白黒 256 階調	
電源	AC100V or DC12V	
重量	ノートパソコン+サポートユニット : 約 8Kg レーダ回路 : 約 2Kg	
データ処理	計測用ノートパソコンで実施	
標準データ処理機能	差分処理, STC 処理, フィルタ処理	

※(1) 計測中は RAM に記録し、計測終了後ハードディスクに記録。

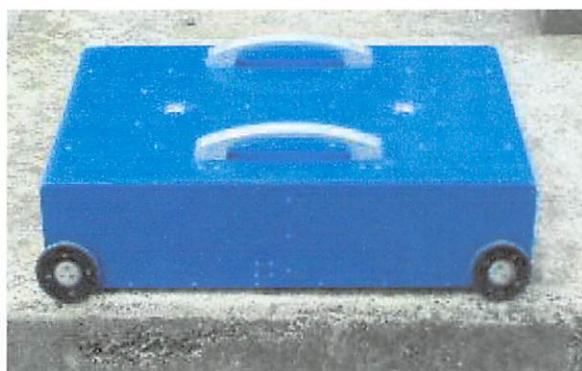


写真-2.1 MGPR-10 (アンテナ 400MHz)



写真-2.2 アンテナ 200MHz 測定状況

表-2.2 機器の仕様 (地中レーダ探査機器)

項目・形式		仕 様			メーカー
観測器 GPR-10C	アンテナ部	電気性能	送信パルス	1.5nsec/ベースバンドパルス	(株) 光電製作所
			繰り返し周波数	1.6MHz	
			送信出力	約28Vp-p(50Ω終端)	
			受信利得	64dB(高周波利得)	
		筐体	構造	箱型(距離センサ付車輪使用)	
			シールド	フェライト電波吸収体	
			エレメント形状	三角アンテナ	
			ローディング	抵抗体装荷	
			アンテナ入力インピーダンス	50Ω	
	画像表示処理部	LCDディスプレイ	SVGA 800×600(10.4インチ)		
		外部入出力端子	アンテナ接続端子(×1)		
			RS-232Cポート(×1)※1		
			USBポート(×1)		
			コンパクトフラッシュポート(×1)		
	装置外寸法	741×710×765(mm)			
重量	55kg(バッテリー、付属品等含まず)				
電源電圧	+12～16VDC/AC100V(50/60Hz)				
消費電力	50W以下(TYP)				



2.3 反射画像解析

地表面から放射された電磁波は、図-2.3 に示したように、アンテナを中心にして深度の増加とともに円錐形状に広がり、その角度は中心角 45° 前後であると考えられている。又、ひとつの物質を対象とした反射画像のうち、もっとも浅く検出された位置にその物質は存在する。

(※1)

地中レーダ探査により得られる反射波

は、実際には波形として記録される。波形間隔は通常 2cm 間隔で収録される。(※2)

この記録波形を処理することにより、アンテナ走査下部の地中を断面状の可視記録として表示される。

波形処理した可視記録は、図-2.4 に示したように反射面の振幅が大きい方から

黒、白 ⇒ グレー (256色グレースケール)

赤 ⇒ 黄 ⇒ 緑 ⇒ 青 (32色カラースケール)

の画像で表示出来る。

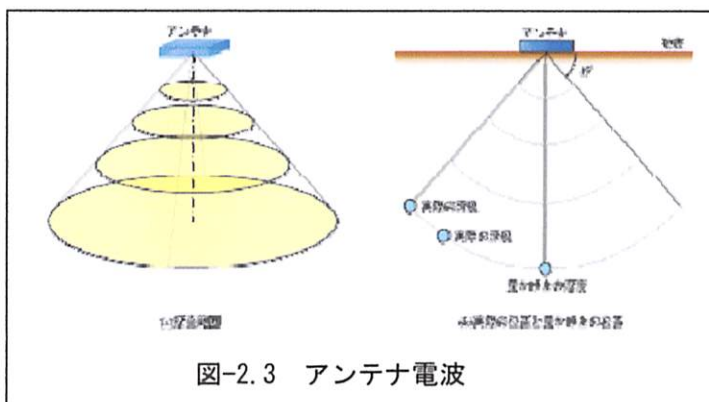


図-2.3 アンテナ電波

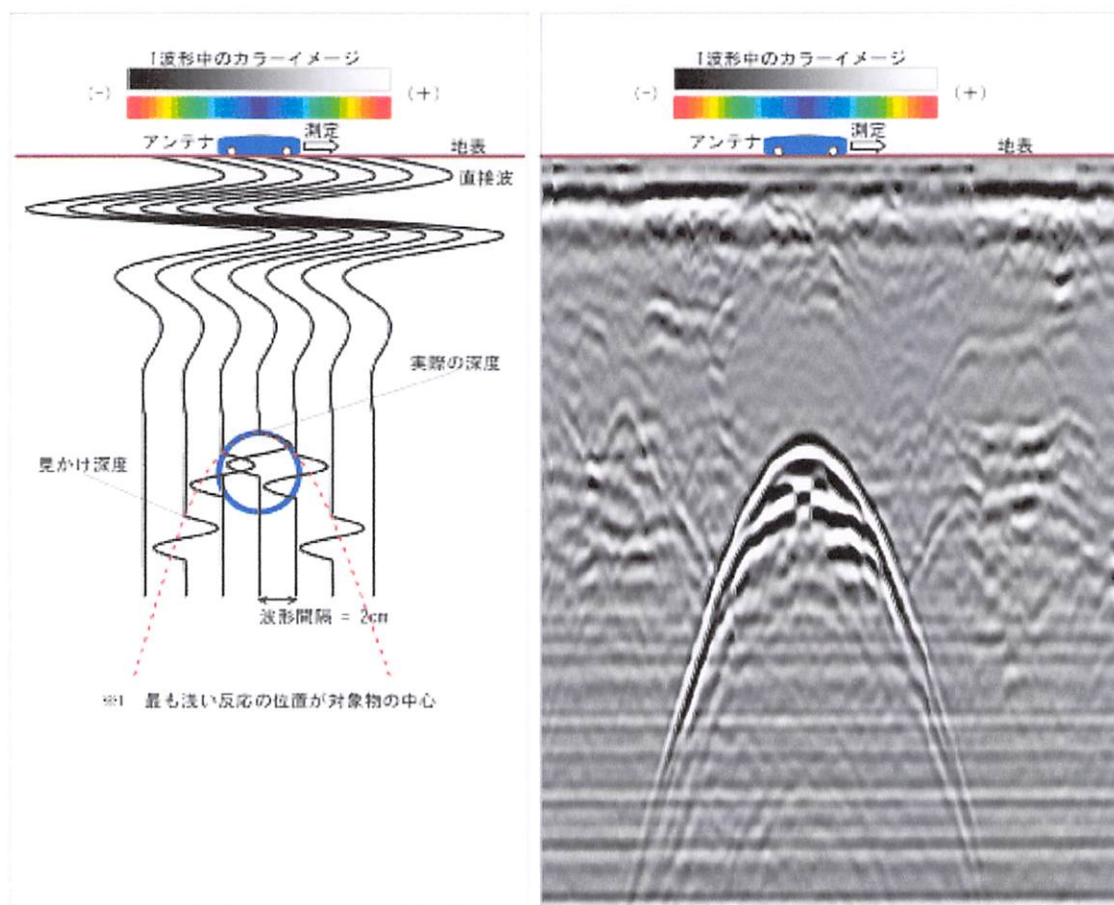


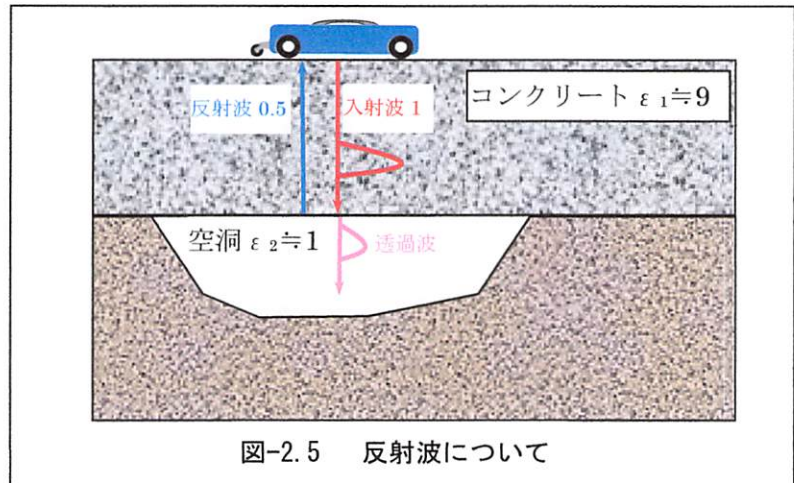
図-2.4 反射波の形状

2.4 空洞の調査

電磁波の伝播速度は、1nsec (10⁻⁹sec) あたり空気中では約 30cm、水中では約 3cm であり、土質地盤中ではこれらの中間（空気中の約 1/3）に存在すると考えられる。

地表から入射された電磁波は、地中においてその構成成分が均質であれば無反射の状態に進み、反射波は表れない。しかし、地中に何らかの伝播速度が異なるもの、いわゆる比誘電率が異なるものがあれば、その境界面で反射波を生じる。反射係数を R 、1 層目の比誘電率を ϵ_1 、2 層目の比誘電率を ϵ_2 とした時、垂直入射の反射係数 R は式-2.3 で示される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \dots \text{式-2.3}$$



ここでコンクリート背面空洞の場合を例に考える。アンテナから放射された電磁波は、図-2.5 のように地盤中を伝播する。第 1 層がコンクリート、第 2 層が真空(空洞)の場合、コンクリートの誘電率を 9、空洞の誘電率を 1 とすると、 $R=+0.5$ となり、その時の反射波振幅は入射波振幅の約半分かつ同位相の波が返って来る事になる。

つまり地表で計測される反射波は、アンテナから放射された波と比較するとそのエネルギーは小さくなる。この小さい反射信号を電氣的に増幅して、処理することにより、明瞭な反射断面が得られる。

地中レーダ探査により空洞や埋設物の有無などを対象として調査する際には、得られた反射断面から判断することから、反射断面上で空洞や埋設物がある箇所とない箇所との反射形状を比較検討する必要がある。つまり対象とする埋設物などの直上からのみの計測では、反射形状に差が現われないため、埋設物の有無などの判断は出来ない。このような場合には、対象とする埋設物を横断するように、計測した測線と直交方向の測線を追加設定して確認することが望ましい。

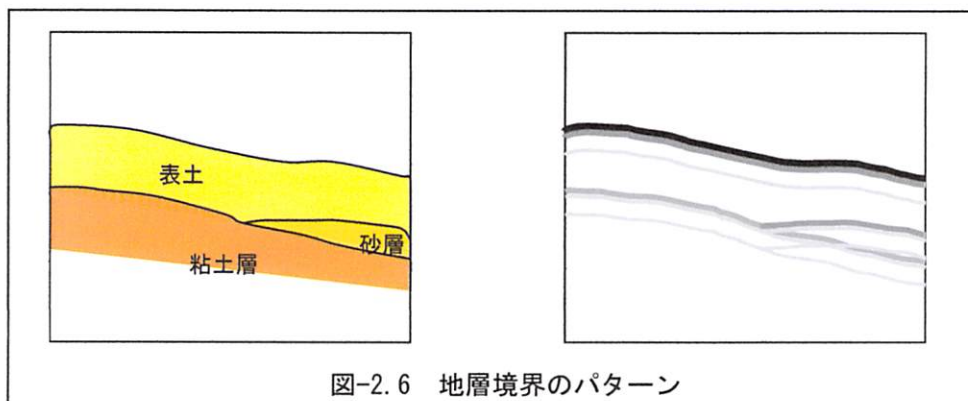
地中に存在している物質の違いによっても、それらからの反射の強弱などに違いが生じる。また同じ土質であっても、乾いた地盤と水を含んだ地盤とでは伝播速度や反射波の強度に差がある。地中レーダ探査の解析に際しては、これらのことを十分に認識してデータの判読を行う必要がある。

2.5 反射画像の解釈

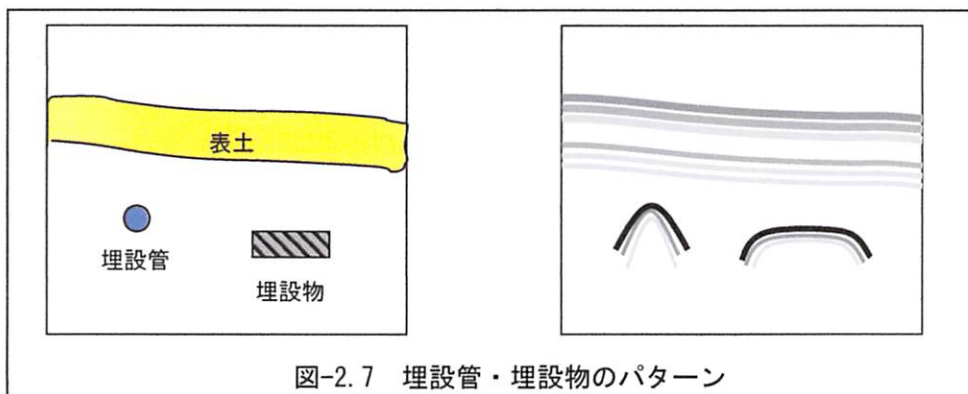
地中レーダ探査によって得られる記録は、断面的に表示された画像として見る事が出来る。これはアンテナから発信し、地中で反射して戻ってきた電磁波の波形を多数並べて、振幅の強弱に濃淡を配したものである。

反射画像にはいくつかの特徴的なパターンが見られる。以下に代表的な画像パターンを示す。

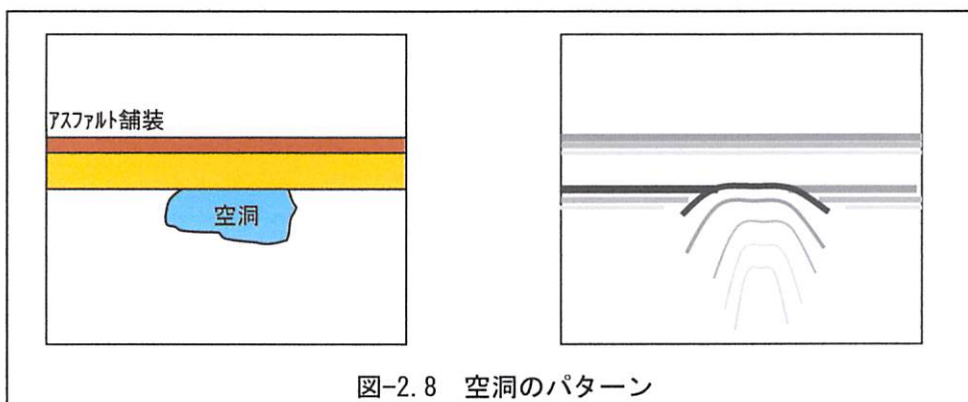
- ・地盤に明瞭な地層境界がある場合



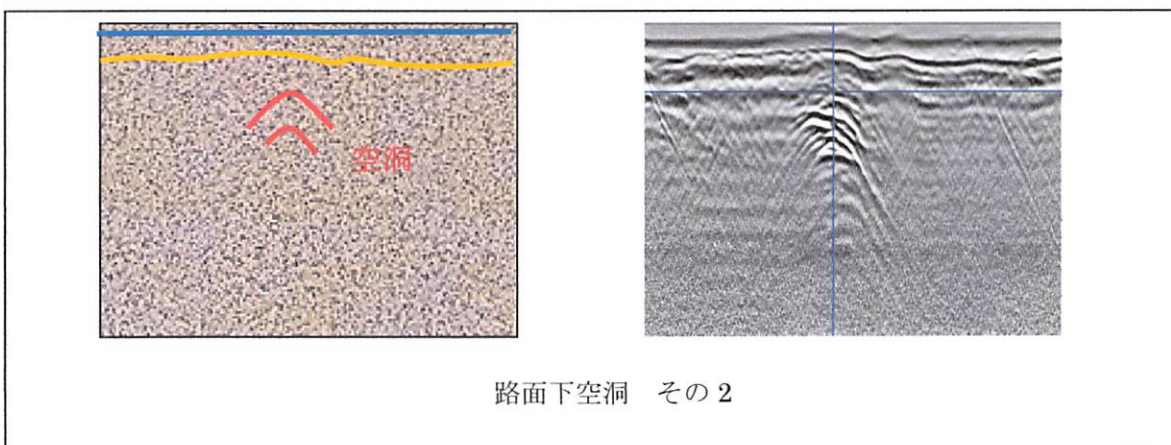
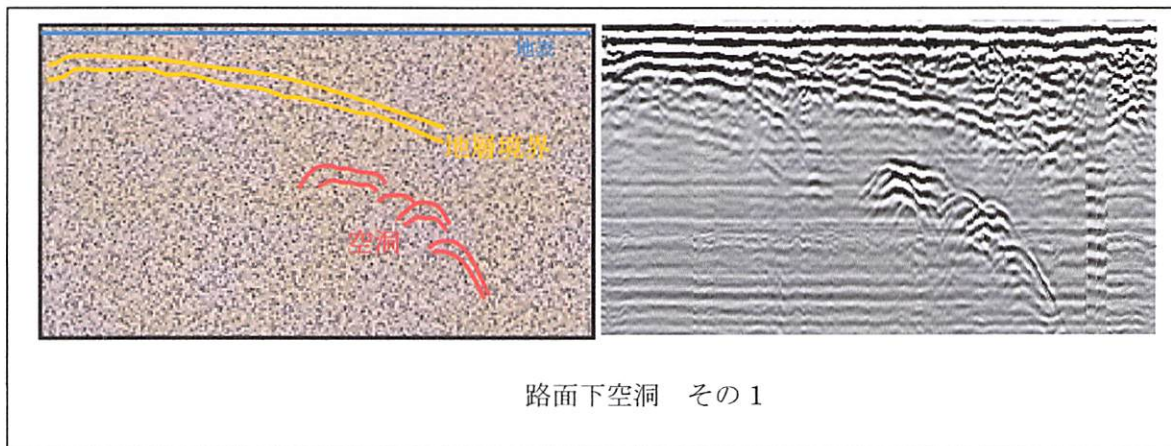
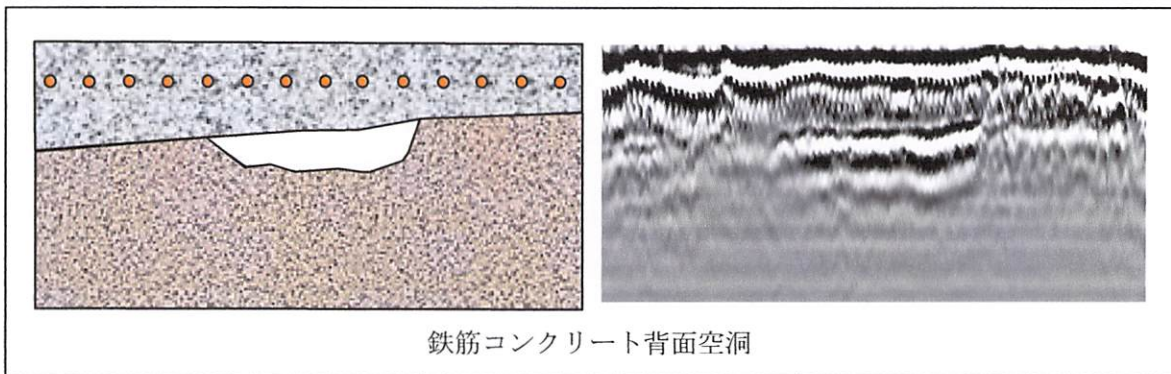
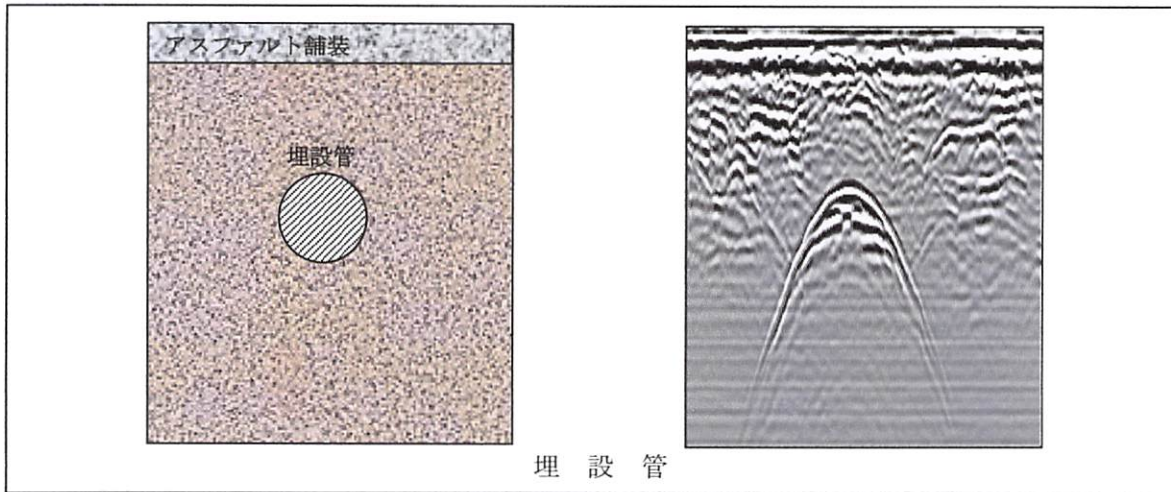
- ・地中に埋設管・埋設物がある場合

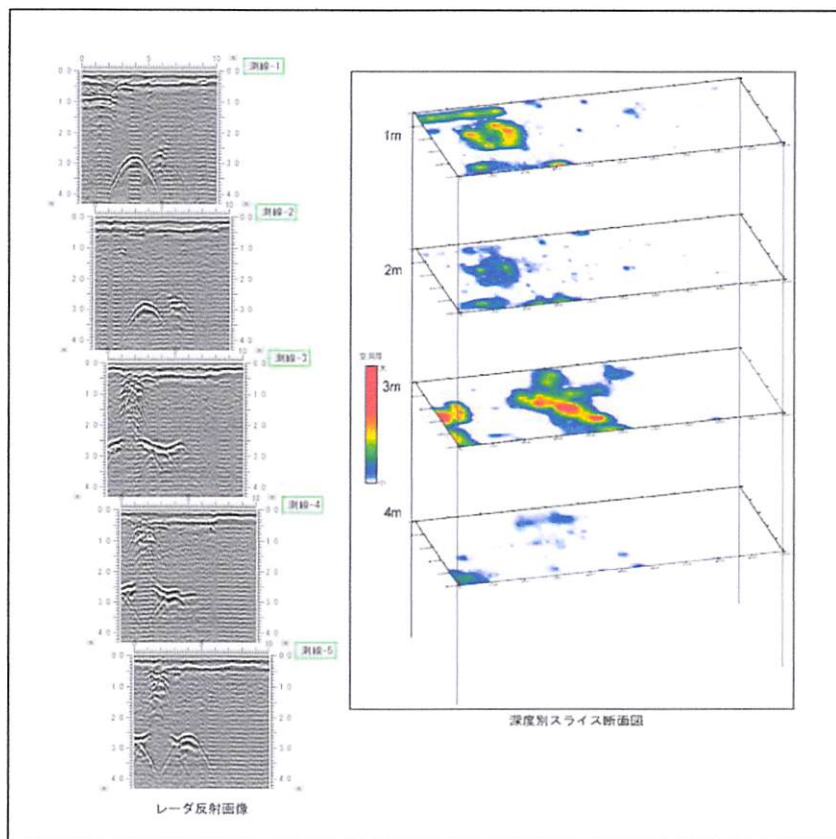


道路のアスファルト舗装下に空洞がある場合



地中レーダ探査記録 事例集





調査エリア内を細かく測定し、データを統計的にメッシュ間隔に解析することにより上図の様に深度ごとのスライス断面を作成することが出来る。

2.6 確認調査

確認調査とは地中レーダ探査実施後、空洞・ゆるみの反応のある位置においてドリル削孔、コア削孔、簡易貫入試験を行い空洞の有無の確認とともにレーダ探査の深度補正の基礎データを取得することを目的とする。特に空洞が確認された位置においては小口径ファイバースコープおよびボアホールカメラで空洞の状況を撮影することが可能である。

・ハンマードリル削孔

ドリル削孔径はφ22mm、最大削孔長は1.2mである。

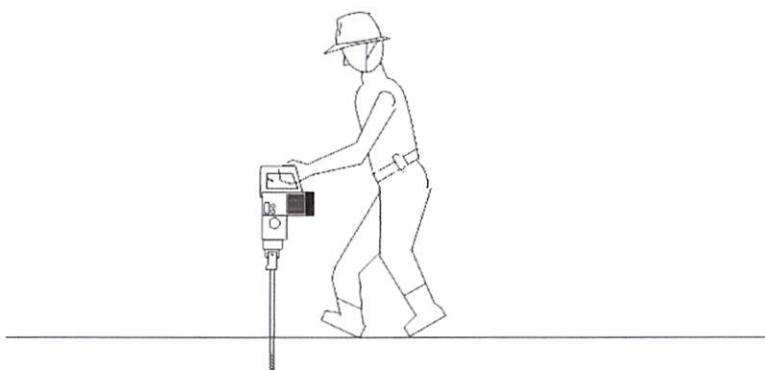


図-2.9 ハンマードリル削孔のイメージ



写真-2.4 HILTI TE70

・コア削孔

主にコンクリート護岸、法面、トンネル等でコア採取、空洞確認の際に有効である。

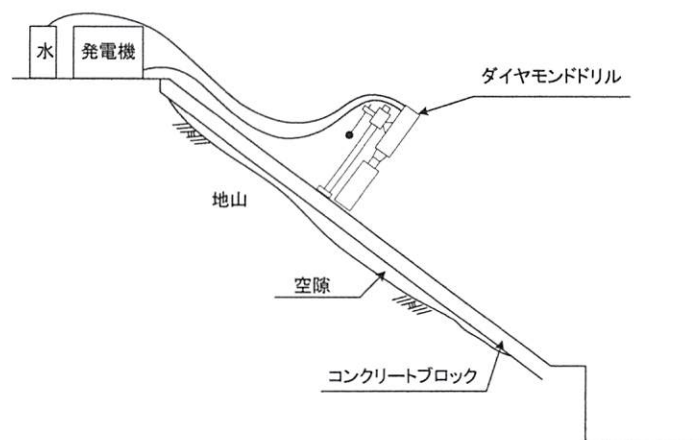


図-2.10 コア削孔概要図

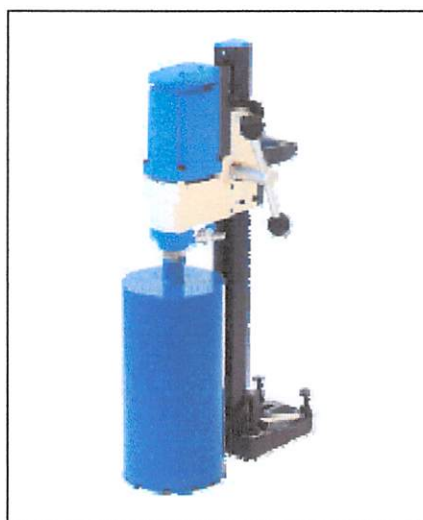


写真-2.5 ダイヤモンドドリル

項 目	仕 様
機 種 名	TS-182 (株)シブヤ 製
最 大 穿 孔 能 力	200mm
全 高	803mm
ベ ー ス 横 幅	158mm
ベ ー ス 奥 行	217mm
全 ス ト ロ ー ク	488mm
モ ー タ ー 込 み 質 量	16.3kg
搭 載 モ ー タ ー 名	R1711
電 源 ・ 電 圧	単相 100V
無 負 荷 回 転 数	700min ⁻¹
消 費 電 力	1700W
最 大 入 力	2550W

2.7 空洞撮影

コンクリート構造物の削孔完了後、コンクリート背面の空洞撮影を行う。撮影はファイバースコープ又はボアホールカメラを用いて行い、各孔の空洞状況を静止画で撮影する。尚、撮影器の光源が弱い場合、大きな空洞は奥行まで撮影できない場合があることは了承して頂きたい。

- ・ファイバースコープ



写真-2.6 ファイバースコープ

表-2.3 ファイバースコープ機器仕様

外形寸法	先端部外形φ6.9mm 有効長 1.5m/3.0m
重量	約480g(電池含まず、ケーブル1.5mの場合)
ケーブル部外装	ポリエチレン樹脂チューブ
総画素数	41万画素 (811(H)×508(V)pixel)
有効素子サイズ	2.4mm(H)×1.8mm(V)
解像度	525(H)×480(V)TV本
ノーマルシャッター	AEC 1/60秒～1/100,000秒
照明方法	高輝度白色LED方式(3灯) 5段階光量調整可能
アングル方向	全方向(360度)
アングル角度	90° 以上
先端硬質長	15mm
アングル駆動方式	手動(ジョイスティック湾曲操作)
防水性	VJケーブル部防水
記録メディア	MicroSDカード* 最大2GB (SDHC規格マイクロSDカードは不可)
静止画記録	JPEGフォーマット
動画記録	640×480pixel MotionJpegフォーマット (avi拡張子ファイル、Windowsメディアプレイヤーなどで再生可)
電源	・単3アルカリ電池 ×4本 連続使用時間 約2時間(アルカリ電池または充電式 ニッケル水素電池の使用をお勧めします)。ACアダプター(6V/0.85A)
消費電力	約2.5W
液晶モニター	2.4inch カラーデジタルTFT (480×234pixel)
使用温度範囲	－30℃～60℃(結露なきこと)

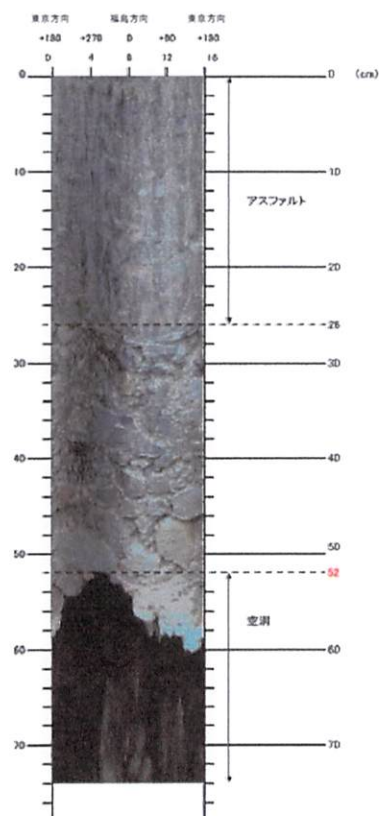
- ・小口径ボアホールカメラシステム (BIP-mini)



写真-2.7 BIP-mini ボアホールカメラシステム

表-2.4 ボアホールカメラ機器仕様

項目		仕様
小口径ボアホールカメラユニット	寸法、重量	径：φ36mm、長さ：1500mm、2.5Kg
	動作環境	-5℃～45℃
	照明	白色LED 18灯
	カメラ	画素数：38万画素、レンズ：焦点距離 f1.9
延長アルミロッド	寸法、重量	25mm×25mm、長さ1500mm、500g
制御ユニット	寸法、重量	W：240mm、D：210mm、H：82mm 3Kg
	動作環境	-5℃～45℃（結露なきこと）
	電源	AC100V～240V Max 1.5A
昇降機	寸法、重量	W：270mm、D：315mm、H：570mm 12.5Kg
	動作環境	-5℃～45℃（結露なきこと）



撮影結果例

2.8 簡易貫入試験概要及び調査方法

簡易貫入試験は表層内の絞り具合・ゆるみ・硬さなどの変化を連続的に測定し、基盤面の分布・地盤内の強度の不連続面・地盤の構成・空洞の有無などの調査に用い、土塊の位置・規模・空洞位置等の推定に使用します。

簡易貫入試験機の構成は図-2.11 に示す。②のノッキングヘッドの上面に④の 85cm のガイドロッドを繋ぎ、⑤のウェイトをセットした。ノッキングヘッドの下方には貫入コーン、43cm ロッド及び 50cm

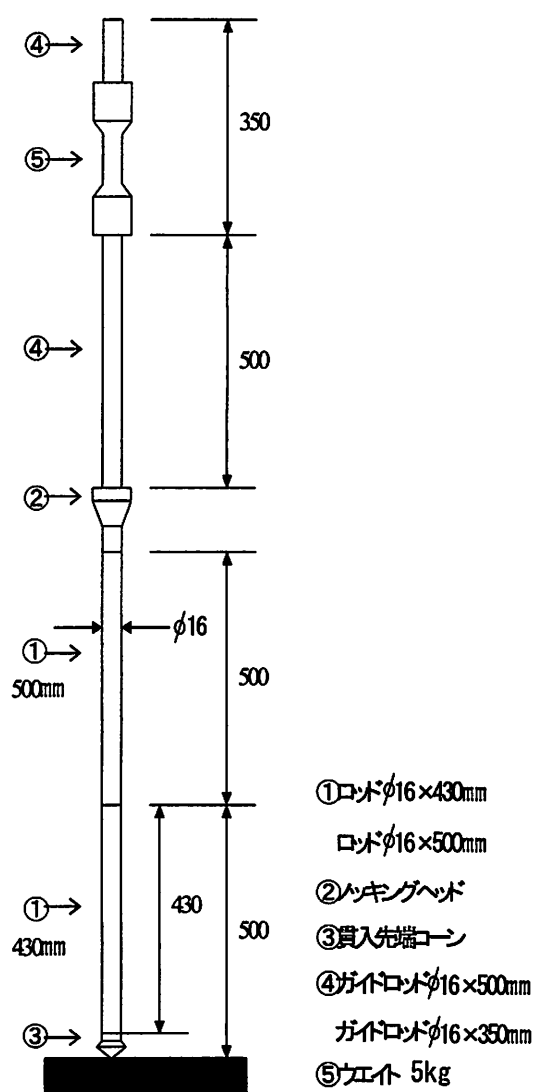


図-2.11 簡易貫入試験機構成図

ロッドとなりコーンの先端からノッキングヘッドの取り付け部までの長さは100cmとなった。

測定地に装置全体を鉛直に立て、ガイドロッド 50cm の所にウェイトの下面が来るまでウェイトを持ち上げ、ガイドロッドに沿って自由落下させた。この操作を繰り返し行い、コーンが 10cm 貫入するまでウェイトの落下を続け、その時の打撃回数を記録した。ロッドの継ぎ目が地表面に近づいたら新しく 50cm ロッドを継ぎ足し測定を続けた。試験中、明らかにコンクリート構造物又は礫等のため貫入不能になった場合は操作を打ち切り、測定地点をずらせて再試験を行った。

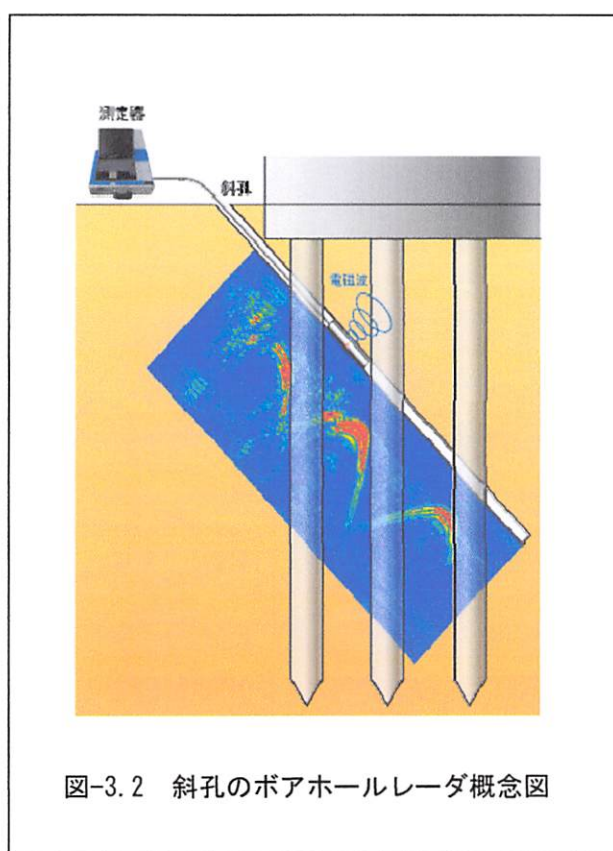
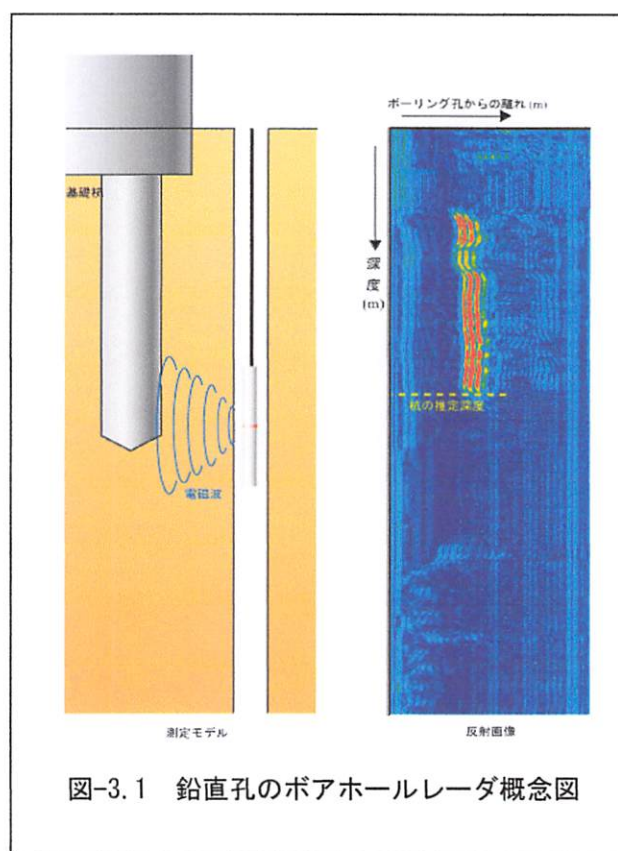
本調査で求めた打撃回数を N_c 値（径 16mm のロッドの先端を径 25mm、先端角 60° のオーバーサイズの円錐形コーンにしたものを、5kg のウェイトで 50cm 落下させることにより地盤中にコーンを 10cm 貫入させるのに要する打撃回数と定義する。）とし、地盤の空洞の有無の確認に使用した。

3. ボアホールレーダ

3.1 ボアホールレーダ概要

ボアホールレーダは地中レーダ探査で使用するアンテナをボーリング孔に挿入できるように改良することにより、構造物基礎杭の根入れ深度や配列を把握することの出来る探査方法である。

アンテナからボーリング孔外に向けて発射された電磁波（電波）が、伝搬媒体となる土や地層と電氣的性質の異なる物質にあたって反射する。その反射波が、再びボーリング孔内に戻り受振アンテナに到達したときの往復時間から反射物体までの距離を求め、アンテナをボーリング孔内で移動することにより深度方向の位置を二次元の断面図で表わすことができる。



対象杭とボーリング孔の離れ

- ・ **0.5m** 未満（近ければ近いほど良い）

孔径

- ・ ボーリング孔には **VP65** 以上の塩ビパイプ挿入

深度

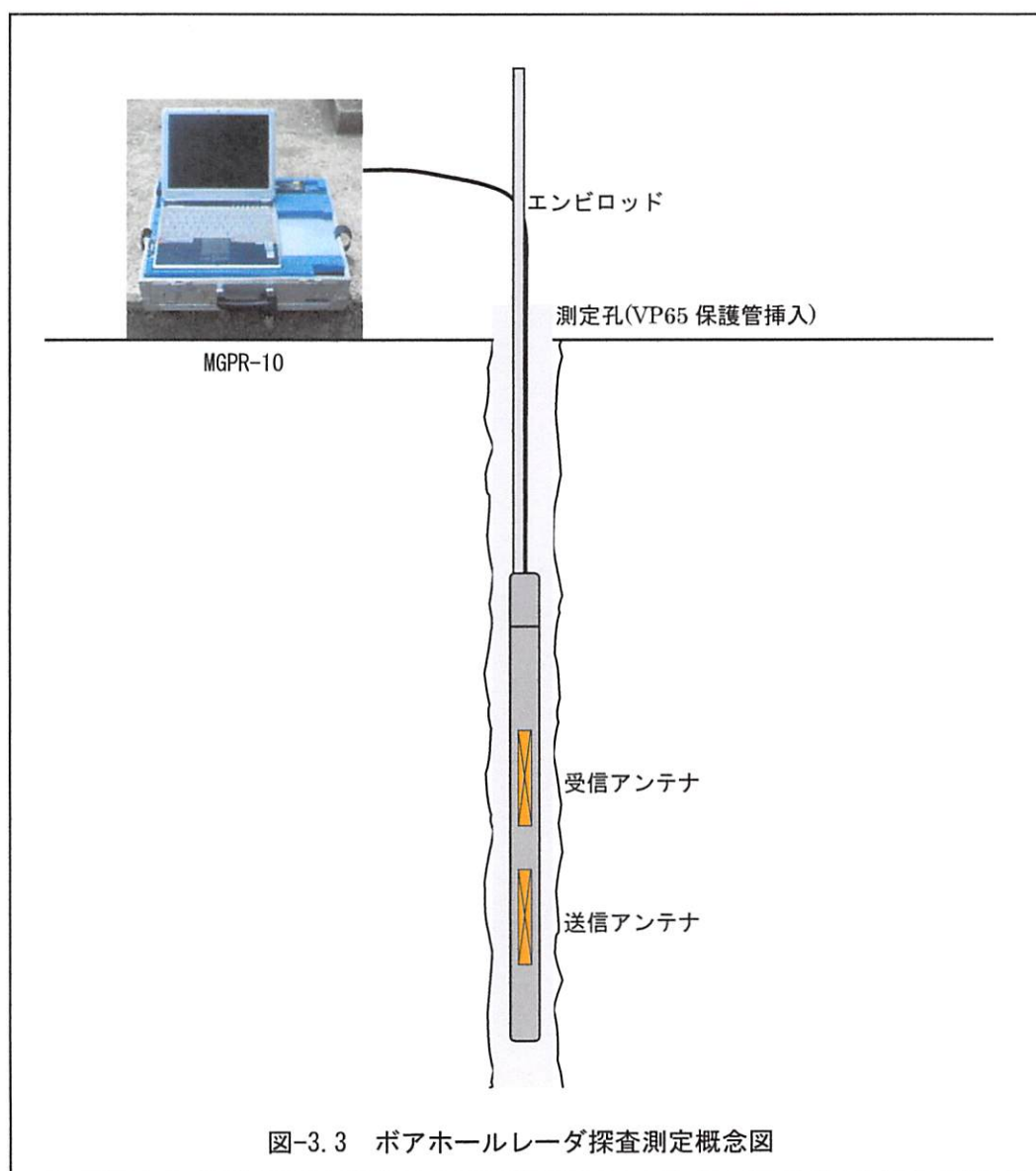
- ・ 杭の推定下端深度よりも **5 m** 以上の余掘りが必要

3.2 ボアホールレーダ測定方法

測定対象杭の近傍に測定孔を掘削し、VP65 のエンビパイプを挿入して孔壁を保護する。その際、ボーリング孔は対象杭から 0.5m未満を目安に配置する。また、目的とする杭の位置が不明の場合、複数の測定孔を配置することが望ましい。又、斜めボーリング孔を使用することにより杭の配列位置を把握することも可能である。

アンテナをボーリング孔に挿入しゲインの調整を行う。アンテナを動かしながら、測定器ディスプレイにあらわれる反射波形、反射画像を参考に何度か繰り返し適正ゲインに設定する。

送信アンテナと受信アンテナの中心を測定深度に合わせ、アンテナの方向をエンビロッドで制御しながら孔底から地表面に引き上げながら測定する。図-3.3 にレーダ探査の概念を示す。



3.3 ボアホールレーダ機材

ボアホールレーダ探査装置の仕様一覧を表-3.1 に示す。

表-3.1 ボアホールレーダ探査 仕様一覧

項目	ボアホールレーダ探査 (MGPR-10)	コマツ エンジニアリング(株)
アンテナ中心周波数	600MHz	
アンテナ形状	φ55mm × 850mm (990mm ウェイト含む)	
アンテナ指向性	±45°	
ケーブル長・耐圧	30m	
AD コンバータ分解能	12bit	
データビット長	16bit	
平均処理回数	256 回 (可変)	
時間レンジ	10, 20, 30, 60, 120, 240 (切替式)	
データ記録媒体	RAM→ハードディスク※(1)	
画像表示階調	カラー32 階調・白黒 256 階調	
電源	AC100V or DC12V	
重量	ノートパソコン+サポートユニット：約 8Kg レーダ回路：約 2Kg	
データ処理	計測用ノートパソコンで実施	
標準データ処理機能	STC 処理, フィルタ処理	



写真-3 ボアホールレーダー式

4. 磁気検層

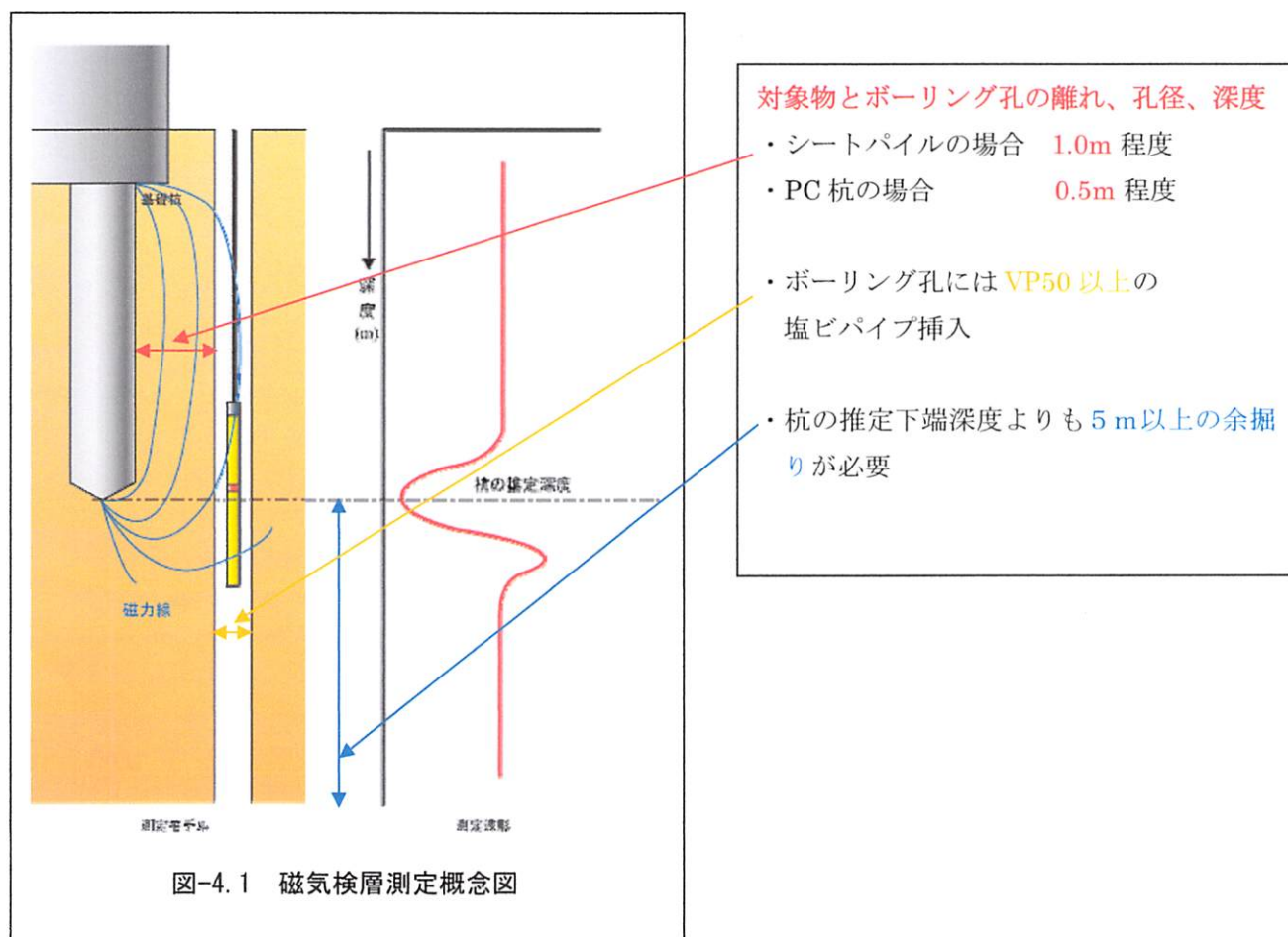
4.1 磁気検層概要

調査孔に両コイル型磁気傾度計（検知器）を孔口から孔底まで緩やかに吊り下げ、又は吊り上げてその間を連続して測定を行う。

図-4.1 に鉛直磁気探査測定概念図を示す。

検知器はフラックスゲート方式を利用した一軸差動型である。プローブには、上部と下部の二箇所に磁気検知コイルが内蔵されており、内蔵コイルが検知した磁気強度変化を電気信号に変換して、測定器本体に記録している。この二つのセンサーは 1m 離れており、上部センサーと下部センサーの 2 点で磁気強度変化を捉えていることになる。

このうち単振波形は、杭体内部の鉄筋からうける磁界の強さを下部センサーが捉えたものである。一方、差動波形は上部センサーと下部センサーそれぞれが捉えた単振波形の「差」をとったものである。差動波形の場合、一様な磁場（地磁気）中では、上部・下部ともに受ける磁界の強さが同じであるため、その差は零となる。これに対し、局部磁界（埋没鉄類）があると 2 個の検知コイルの受ける磁場の大きさが異なり、その大きさに比例した磁界の差が出力電圧となり信号を発生する。



4.2 磁気検層機材

磁気検層測定器の仕様を示す。

MB101 の仕様

- (1) 主要性能
 - (a) 検出方式 : フラックスゲート方式
 - (b) 感度 : $\pm 0.5, \pm 1.0, \pm 2.0, \pm 5.0, \pm 10$ (μT)
{ $\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 50, \pm 100$ (mG) }
 - (c) 精度 : 指示計 各感度のフルスケースの $\pm 10\%$
: レコーダ出力 各感度のフルスケースの $\pm 2\%$
 - (d) 動揺雑音 : 0.02 (μT) { 0.2 (mG) }
 - (e) 動揺雑音温度特性 : 0.004 (μT) / $^{\circ}\text{C}$ { 0.04 (mG) / $^{\circ}\text{C}$ }
 - (f) 分解能 : 0.001 (μT) { 0.01 (mG) }
 - (h) 出力 : レコーダ出力 磁気信号 (各感度のフルスケースの $\pm 1\text{V}$)
地磁気信号 (± 50 (μT) のとき $\pm 1\text{V}$)
: 警報出力 スピーカ用
- (2) 使用電源
 - (a) 電源 : 単 2 乾電池 8 個又は $\pm 6\text{V}$ 直流電源
- (3) 外圍条件
 - (a) 動作温度 : $-10 \sim +40^{\circ}\text{C}$
 - (b) 耐水性 : 検知器, ケーブル水深 30m

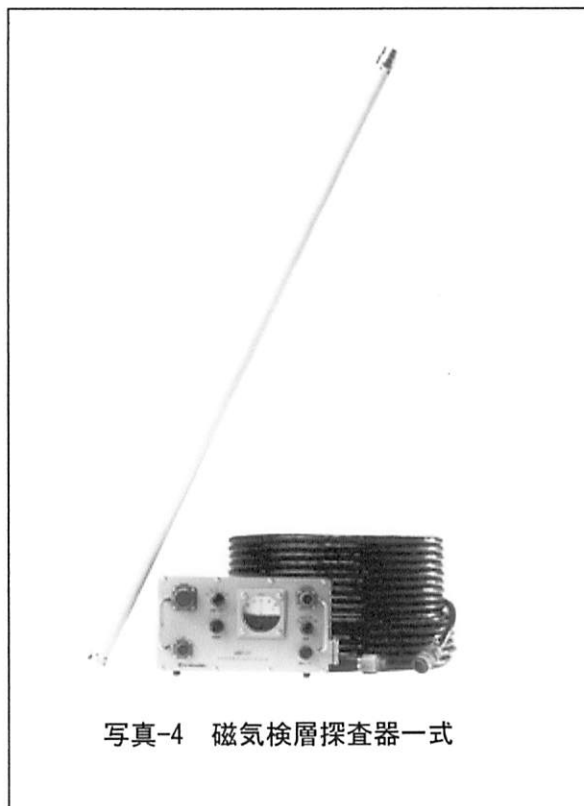


写真-4 磁気検層探査器一式

5. 速度検層

5.1 速度検層概要

調査孔内に受振器を設置した状態で、杭体上部のコンクリート面をハンマーで打撃し、弾性波動を発生させ孔中受振器でその波を観測する。

対象構造物上部のコンクリート面を打撃した時に発生した波動は、P C杭体を伝播し、杭体を抜けた後は地盤を伝播することから、走時曲線の変曲点を両者の境界として評価し、根入れ深度を決定する。

速度検層法による根入れ調査の概要を図-5.1 に、使用機器の仕様を表-5.1 に示す。

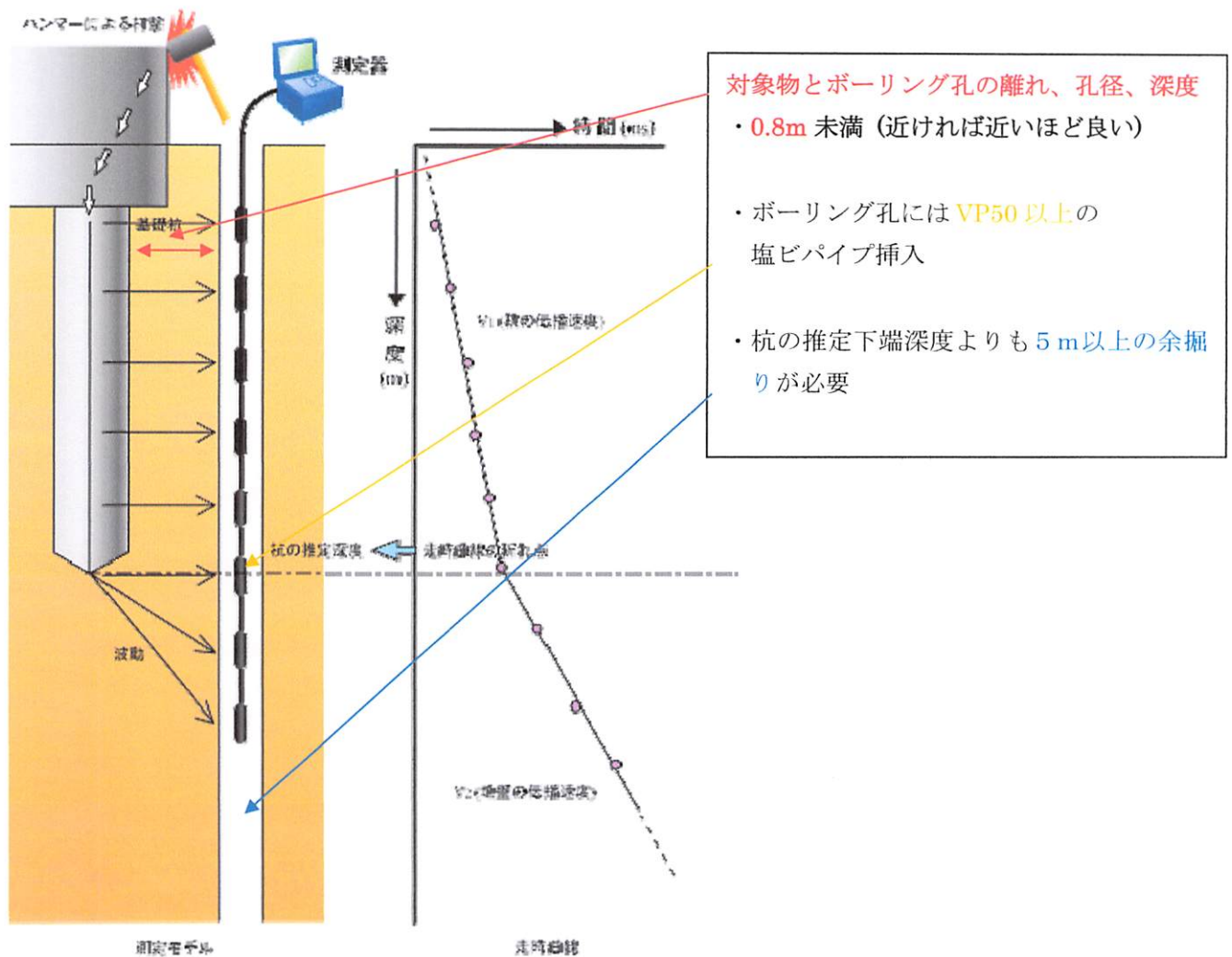


図-5.1 速度検層概要図

表-5.1 速度検層測定器仕様

項目・形式	仕 様		メーカー	
観測器 McSEIS-SX MODEL-1125A	収 録 部	入力インピータンス	20k Ω (差動)	OYO
		利 得	256倍, 1024倍 (AUX成分は1倍に固定)	
		周 波 数 帯 域	10Hz～4600Hz	
		A / D 分 解 能	18ビット	
		サンプリングレート	25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 μ sec.	
		メモリー 長	1024ワード, 2048ワード	
		フリトリカ	0, 128ワード	
		トリカレハル	100～1000mV設定可能 (100mVステップ)	
		成 分 数	24ch + AUX1ch	
	システム総合	C P U	i486	
		ディスプレイ	640 X 480ドットLCD, 10.4インチ	
		フロッピーディスク	3.5インチ (MS-DOS形式 720KB, 1.44MB)	
		内蔵ハードディスク	1.2GB (250MBのみパーティション設定済み) 最大256ファイルを同時収録可能	
		インターフェイス	パラレルI/F (外部プリンター用) 外部キーボードI/F (装置メンテナンス用)	
		外 形	(W)330 X (H)280 X (D)220mm 約8 kg	
		電 源	DC 12V, 3A max.	

