

10. 埋設物探査地中レーダの開発

(株)小松製作所： 金光 保雄・片山 幸教・市村 泰彦
坂西 昇一・阿部 友行・岡本 晃

1. まえがき

現在、都市部の地中には水道管、下水管、ガス管、電力ケーブル等が複雑に埋設されており、地下工事を行なう際には試掘を行ないあらかじめ埋設管の位置を確認する必要がしばしば生じる。そこで試掘に要する費用の低減及び工期の短縮のために地中の埋設管の位置を非破壊的に探査する装置の開発が期待されている。

この目的のために埋設物探査用地中レーダの開発を行なった。地中レーダ法（電磁波反射法）は、非金属管も検知できる点、分解能がよい点において他の方法（電磁誘導法等）に比べて優れている。本稿では、開発した地中レーダの構成、埋設物の深さ推定法、テストフィールドにおける試験結果、現場フィールドにおける探査結果について報告する。

2. 装置の構成

地中レーダは電磁波を地中に放射し、地中の物体からの反射波を受信することによって地中の状態を探査する装置である。図1に今回試作した埋設物探査用地中レーダの構成図を示す。バルサにおいて送信波形が生成される。これはパルス幅3 ns程度のモノサイクルパルスで、その繰り返し周期はトリガ回路のトリガ信号に同期しており約3 μ sである。この送信パルスが送信アンテナを通して地中に放射され、地中の埋設物からの反射波が受信アンテナによ

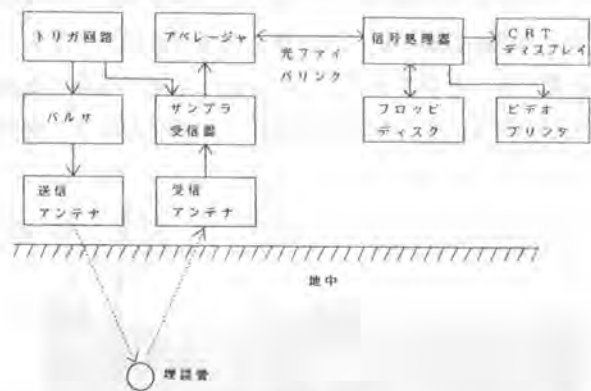


図1 地中レーダの構成図

って受信される。受信された波形は受信機でゲイン調整された後サンブラでサンプリングされてデジタル信号化される。そのデジタル信号は s/n 比を向上させるためにア/D変換機で同相加算される。その後この信号は光ファイバリンクで信号処理器に送られそこで256階調のBモード信号に変換されてCRTディスプレイ、ビデオプリンタ、フロッピーディスクに送られる。CRTディスプレイは白黒256階調になっており、これによって信号レベルの僅かな変化でも検知できるようになっている。

図2は試作した地中レーダの写真である。aはアンテナ台車部であり、この部分を人間が引っ張って探査を行なう。bはディスプレイ部であり、車等に搭載して使用する。なお通常本装置はアンテナ部1名、ディスプレイ部1名、合計2名で操作することができる。

3. 埋設深さの推定

地中レーダによる埋設管探索の大きな問題の一つに埋設深さを精度よく推定することがむづかしいという点があった。本装置では以下に述べる方法によってこの問題を解決している。

埋設管の深さを z ，反射波が返ってくるまでの時間を t ，電磁波の伝搬速度を v ，とすると (1) 式の関係がある。(2) 式で c は真空中での光の速度， ϵ_r は土の比誘電率である。

$$Z = (V \cdot t) / 2 \quad (1)$$

$$V = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

地中レーダが埋設管を横切るように探査した場合を考える。電磁波のビーム指向性が広いので、埋設管がアンテナの真下から横にずれていても反射波が戻ってくる。従って地中レーダの水平方向移動距離を x とすると埋設管からの反射波はBスコープ上では (3) 式のような双曲線状の画像になる。

$$(t^2 - t_0^2) \cdot (v/2) = (x^2 - x_0^2) \quad (3)$$

ここで t_0 は埋設管がアンテナの真下にある場合の反射波が戻ってくるまでの時間， x_0 は埋設物の水平方向の位置を示す。従ってBスコープ上の双曲線（埋設管エコー像）から t_0 ， v ， x_0 を求めればそれらの値から埋設管の深さ及び水平位置を推定することが出来る。本装置では埋設管の反射波による双曲線の表示された画像上にもう一つの双曲線 (t_0 ， v ， x_0 をパラメータとして持つ疑似エコー像) をプロットし、後者の双曲線のパラメータを変化させて前者の双曲線にぴったりと重なるようにする。図3に二つの双曲線を重ね合わせる手順を示す。その重なったときの後者の双曲線の値から実際の埋設管の深さ及び水平位置を推定する。また同時に地中の電磁波の伝搬速度及び土の比誘電率も推定できる。



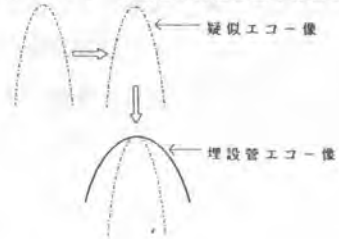
a. アンテナ台車部



b. ディスプレイ部

図2 試作した地中レーダの写真

STEP 1 双曲線の頂点位置を合わせる



STEP 2 双曲線カーブを合わせる

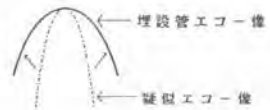
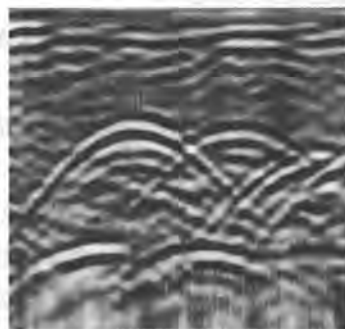


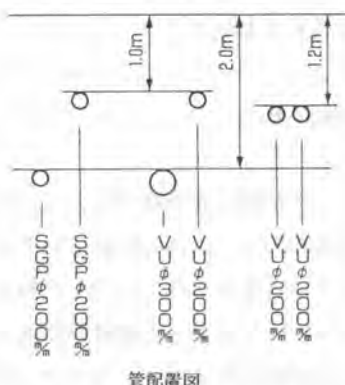
図3 双曲線を重ね合わせる手順

4. テストフィールドにおける試験結果

本装置の有効性を確認するためにテストフィールドにおいて探査試験を行なった。図4に探査結果の画像の一例を示す。各々の埋設管の位置に対応する画像上の位置にそれぞれ明瞭な双曲線状の像が現われている。この画像に対して前節で述べた方法を適用して埋設管の位置を推定したところその誤差は水平方向は±10cm以内、深さ方向はその深さに対して10%以内であった。また土の比誘電率は8~9であった。このテストフィールドは均一な山砂のうえにアスファルト舗装を施したものである。そのほかにも関東ロームのテストフィールドでも探査試験を行なったが探査精度に関してはほぼ同じ様な結果を得た。但し、この場合土の比誘電率は25程度であった。



探査画像



管配置図

図4 テストフィールドにおける探査画像例

5. 現場フィールドにおける探査結果

市街地における本装置の検知性能を調べるために東京都内及びその近郊の数ヶ所において探査実験を行なった。探査結果を正確に評価できるように現場は既に試掘されて埋設管の位置が正確に判っているところを選んだ。表1に探査結果をまとめたものを示す。全体での検知率(検知本数を埋設本数で割った値)は76%であった。表

1.aは探査場所別の検知率を示したものである。これによって検知率が探査場所によってバラついていることがわかる。表1.bは埋設深さ別の検知率を示したものである。これによって100~150cmの埋設深さの埋設管はよく検知できているがそれよりも浅くなったり深くなったりすると検知率が低下することがわかる。この原因としては埋設深さが深くなった場合には電磁波の減衰が大きくなる

探査場所	埋設本数	検知本数	検知率
A	17	13	76%
B	25	21	84%
C	18	12	67%
D	3	2	67%
合計	63	48	76%

表1.a 探査場所別検知率

深さ(cm)	埋設本数	検知本数	検知率
0~60	5	3	60%
60~100	16	11	69%
100~150	33	29	88%
150~	9	5	56%

表1.b 探査深さ別検知率

管種	埋設本数	検知本数	検知率
金属管 100φ未満	9	7	78%
金属管 100φ以上	32	25	78%
非金属管 100φ未満	11	7	64%
非金属管 100φ以上	11	9	82%

表1.c 管種別検知率

こと、浅くなった場合には径の小さい埋設管が多くなることが考えられる。表1,cは埋設管種別の検知率を示したものである。これによって管径の小さい非金属管は他のものに比べて検知率が低いことがわかる。そのほかに検知率に大きな影響を与えるものとして土質がある。図5は狭い範囲に多くの掘削跡のある現場を探索した場合の探索画像である。ここでは埋設管に対して平行に探索しているので、埋設管の像は水平な直線になるはずである。ところが実際の探索画像上では掘削跡の所で直線が途切れている。これは掘削されて埋め戻された土における電磁波の減衰がもとの土におけるそれよりも大きいことを示している。一般に市街地の道路はいたるところ掘り返されているので、ある場所で検知できなくてもそこから2~3mはなれたところでは検知できるとゆうことがしばしば生じる。図6に現場フィールドにおけるもう一つの探索画像例を示す。左端にある2本の埋設管は接近しているため画像上では一つの双曲線になっている。実際今回の現場探索で検知できなかった埋設管のうちの数本はこのような場合であった。表2に現場フィールドで探索した埋設管の深さ精度を示す。これによると90%以上の埋設管について±10cm以内の誤差で深さ推定されていることがわかる。但し、全体に推定値の方が深めになっているのでこの点に関しては改良の余地があると思われる。

6. あとがき

地中の埋設物を非破壊的に探索する装置として地中レーダを試作し、探索試験を行なった。市街地における探索試験では埋設管のうちの76%を検知することができた。また埋設深さ推定精度は90%以上の埋設管について±10cm以内であった。この結果より地中レーダを用いることによって本工事前の試掘の回数を大幅に低減できる可能性のあることがわかった。今後さらに種々の現場において探索試験を行ない、その結果に基づいて試掘回数を低減するための探索ノウハウを高めていく予定である。

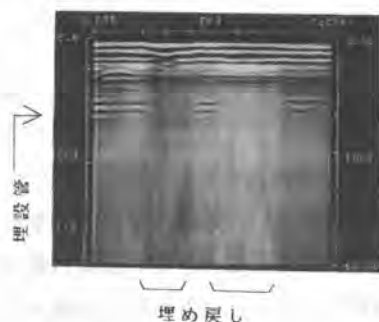


図5 現場フィールドにおける探索画像例
(土質の変化がある場合)

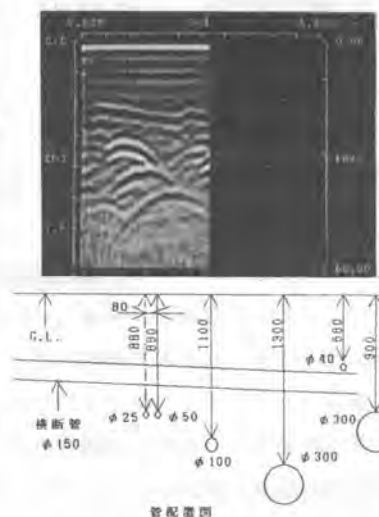


図6 現場フィールドにおける探索画像例
(埋設管が接近している場合)

精度(cm)	分布	精度(cm)	分布
~-10	0%	+5~+10	15%
-10~-5	0%	+10~+15	3%
-5~0	18%	+15~+20	5%
0~+5	59%	+20~	0%

表2 探索深さ精度
試掘によって確かめられた値と
探索によって推定された値の差