

舗装下における路盤・路床変状把握

Exploration under Pavement by Electromagnetic Subsurface Profiling

金子 誓 (かねこ ちかい)

㈱建設企画コンサルタント 土質技術部 次長

宮津 義文 (みやつ よしふみ)

㈱建設企画コンサルタント 土質技術部 課長

関 元 治 (せき もとじ)

㈱建設企画コンサルタント 土質技術部 課長代理

1. はじめに

供用中の道路では上下水道管などの埋設物が浅層部（5 m以内程度）に施工されていることが多い。

このような路面下では、地下水による土砂流出および埋設管渠の老朽化による漏水等により、地盤に緩みが発生する場合がある。この緩みが時間の経過とともに拡大・成長して空洞となり、表層部へと及び路面の突発的な陥没に至る事故も発生している。これに対して各機関では道路維持管理上、その対策として空洞検知装置の開発を進めてきているが、空洞を発生させる前兆現象である舗装下の路盤・路床部の変状状況（緩み、空隙）を事前に把握し、対策を講じることも非常に重要である。ここでは、舗装下の路盤・路床変状把握を対象とした電磁波レーダー探査法による非破壊検査の調査事例について報告する。

2. 舗装下の非破壊検査法

舗装下の変状（緩み、空隙）を探査する手法として従来はボーリング調査に依存するところが大であったが、点による調査のため調査点数を多くしないとその発見率は極めて低いものであった。

最近になって非破壊で探査できる機器がいくつか開発されたが¹⁾、それぞれ次に示すような長所および適用限界がある。

- ① 超音波法……浅層部の探査には有効であるが、作業性と解析手法の開発が今後の課題である。
- ② 赤外線法……数 cm 厚のコンクリート板には有効であるが、数 10 cm 厚のコンクリート構造物の背面の情報を得るのは難しい。

- ③ 電磁波法……深層部探査には難があるが、浅層部探査には有効である。測定は連続で作業性はよく、探査結果はリアルタイムでディスプレイに表示される。

上述した中で最も実用性の高いと判断されるのは電磁波法である。

3. 電磁波レーダー探査手法

3.1 測定原理

アンテナから対象物に発射された電磁波は、一部は反射しその他は減衰しながら透過していき、異なる物質の境界面で反射する。この反射波を観測し、その観測記録から地中の物性境界面の分布および状況を推定しようとするものである。

電磁波は電気伝導度（誘電率）の異なる境界で反射を生ずる。舗装表面下は表層、基層、基盤、路床などより構成されアスファルト、砕石、砂質土、粘性土などの材料から成っている。これらの層では誘電率が異なり境界で進行中の電磁波が反射する。

表一1に各物質の比誘電率の概略値²⁾の一覧表を示す。また誘電率は材料の違いばかりでなく、土の密度や含水状況によっても変化する。これについて保国³⁾らは土粒子、水、空気の内容積率によって誘電率を表せることを示している。表層部以深の地質は単一であることがまれで、含水状態も地盤により様々である。したがって地中においては同じ地質であっても含水状況によって誘電率が変化する。

探査物標深度 d は、反射時間を t とし、電磁波速度 V 、真空中の光速度 c 、媒質の比誘電率 ϵ_r とすると次式により算定される。

事例報告

表－1 比誘電率 (ϵ_r) の概略値一覧表

物質名	比誘電率 (ϵ_t)
空気	1
粘土質 (dry)	2.4
粘土質 (wet)	15
ローム層 (dry)	2.5
ローム層 (wet)	19
砂地 (dry)	2.6
砂地 (wet)	25
氷 (淡水)	4
氷 (海水)	4~8
砂 (dry)	4~6
砂 (淡水飽和)	30
花崗岩 (dry)	5
花崗岩 (wet)	7
石灰岩 (dry)	7
石灰岩 (wet)	8
泥板岩 (wet)	6~7
海水, 淡水	81

表－2 アンテナ選択目安

探査物標	埋設深度	適合アンテナ
地中埋設パイプ	深度 0.5~2 m	300~500 MHz
	深度 2~10m	80~120 MHz
路面下空洞	舗装直下	500~900 MHz
	深度 1~2 m	300~500 MHz
地盤, 岩盤	1~2 m	500 MHz
	2~5 m	300 MHz
	5~20m	80 MHz
コンクリート内鉄筋	5~30 cm	1000 MHz
	10~50 cm	900 MHz
舗装厚さ	5~30 cm	1000 MHz
	10~50 cm	900 MHz
氷の厚さ	5~10m	120 MHz

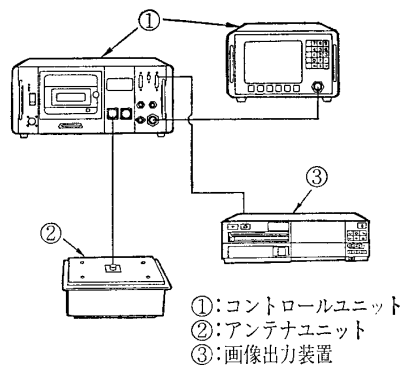
$$d = \frac{V_t}{2} = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

3.2 測定機器および探査方法

測定装置の構成は図－1 に示すとおりで、コントロールユニット、アンテナ、画像出力装置で構成されている。

アンテナの選択は重要で、電磁波の減衰や波長に基づく分解能などを考慮し、探査目的に応じたアンテナを選択する必要がある。一般に、浅部の探査には高い周波数のアンテナを、深部の探査には低い周波数を持つアンテナを選定する。表－2 に探査物標と埋設深度によるアンテナ選択の目安を示す。

路面下の空洞や変状の探査では、通常周波数 300~500MHz のアンテナが用いられる。今回測定に用



図－1 測定装置の構成



図－2 探査状況

表－3 画像解析ソフト

```

graph LR
    Menu[メニュー] --- F1[作成機能]
    Menu --- F2[処理機能]
    Menu --- F3[プリント機能]
    Menu --- F4[ディスプレイ機能]
    Menu --- F5[縮小機能]
    F2 --- F2_1[プリント機能]
    F2 --- F2_2[ディスプレイ]
    F2 --- F2_3[フィルター]
    F2 --- F2_4[エディット機能]
    F2_4 --- F2_4_1[FIR]
    F2_4 --- F2_4_2[IIR]
    F2_4_2 --- F2_4_2_1[ディコンボリューション]
    F2_4_2 --- F2_4_2_2[ヒルベルト変換]
    F2_4_2 --- F2_4_2_3[マイグレーション]
    F2 --- F2_5[レンジゲイン機能]
    F2 --- F2_6[アンテナアレー機能]
    F2 --- F2_7[保存機能]
  
```

いたアンテナは周波数 500 MHz である。アンテナ部は縦横約 30 cm、高さ 20 cm の箱型で、質量約 4 kg である。

現地調査に基づき表面状況や付近の路面のたわみ・クラックなどの変状から探査測線を設定する。測定は図－2 に示すように、アンテナを測線上で走行させて測定する。また、重点箇所や特異箇所についてはこの測線を横切る横断測定を実施し、変状の範囲を把握することができる。アンテナの走行速度は探査目的に応じ設定するが、概査では車両を用いた測定が有効であるが、より多くの情報を得る詳細調査では 10~20m/分程度で測定することが多い。

3.3 画像解析

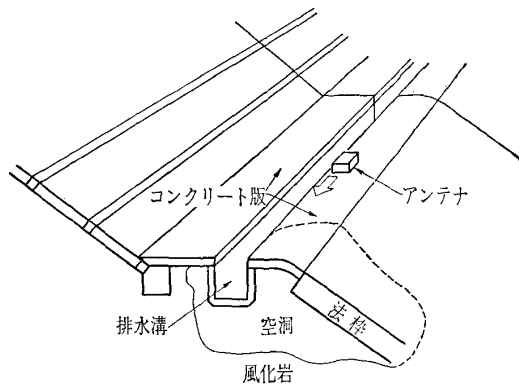
電磁波レーダー探査装置に収録されたデータは多くの情報を含んでいる。その中から必要な情報を抽出するためには、データの解析処理が必要である。一般的には、表—3に示すような各種フィルターが知られており、探査装置としては多くの解析処理機能を装備していることが望ましい。

4. 調査事例

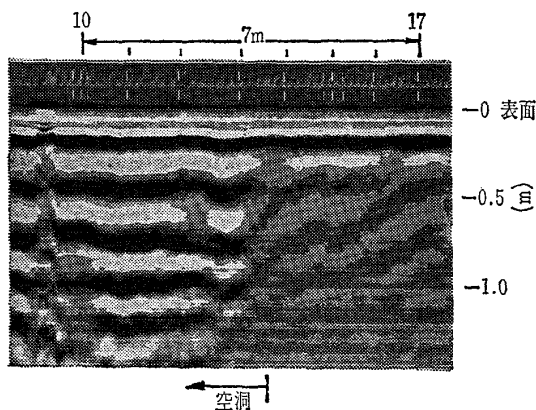
4.1 薄いコンクリート下の変状

舗装コンクリート下の地盤では漏水や浸水により空隙が生じ安定上問題となることがある。図—3に示すように、法面の小段部なども薄いコンクリートで覆われている。このような場所では豪雨時などの出水により排水溝の周辺では流下越流した雨水により空隙を生じ不安定化（空洞）することがある。

図—4はコンクリートシール（厚さ10cm）下の空洞部の境界付近の記録を示したものである。画像の左半分が空洞（深さ70cm）を、右半分が健全部を示し、空洞部では特徴的な強い反射波とリンギング（振動）が現れている。健全部では透過波は減衰しながら進行し、このような強い反射波は見られない。



図—3 法面小段における探査状況



図—4 コンクリートシール直下の空洞

4.2 アスファルト舗装下の探査

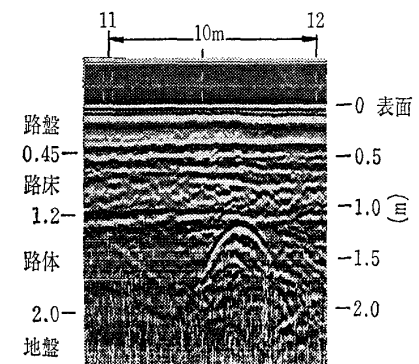
アスファルト舗装の下には電線や水道管、排水管などの構造物が埋設されていることがある。供用中の道路の維持補修や改築ではこれらの埋設物の存在の有無や位置の把握も必要となる。図—5はアスファルト舗装下の探査記録である。

舗装面下は表層、基層、路盤、路床、路体で構成され、上部路床はセメント安定処理され、下部路床は砂質土、路体は粘性土である。

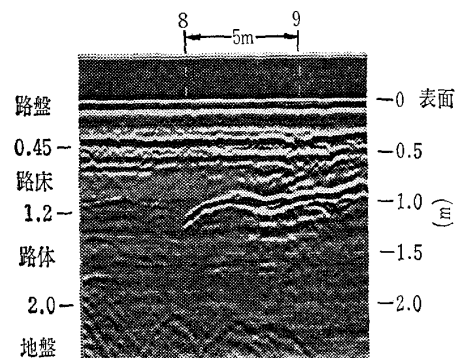
画像中央には表面下1.1mに埋設されているヒューム管（ $\phi 100$ mm）の反射映像が示されている。半円状に現れているのが埋設管で、代表的なパイプの反射波パターンである。地盤材と異なる物質では比誘電率の差があるため明りょうな反射波となる。

また、アスファルト表面下の路盤と路床では材質が異なり、この境界で反射が起こる。画像中では45 cm および 120 cm 付近に示されている。この記録のように誘電率が顕著に異なる物質の境界では明りょうな反射波が得られ、識別できる。

図—6は路床部に空隙の存在が推定される記録である。画像中の中央部から右端にかけて現れている強い反射波は空隙を示すがリンギングが少なく、反射波の幅が狭いため大きな空隙とはなっていないことが判読できる。



図—5 埋設管の反射波パターン



図—6 空隙の解析チャート

事例報告

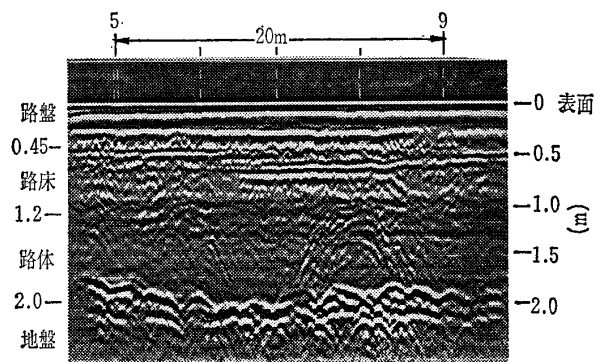


図-7 浸水による緩み

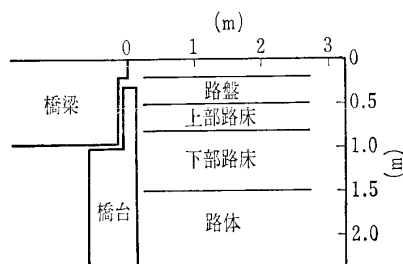


図-8 橋台付近の舗装構造

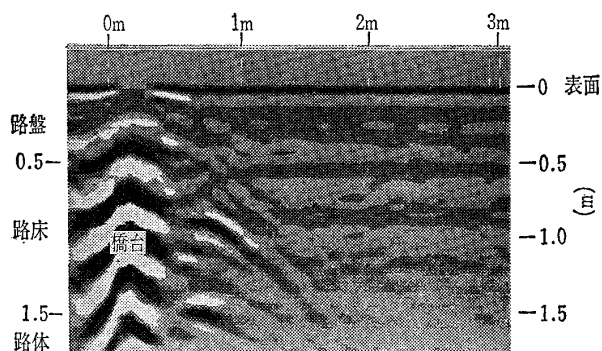


図-9 橋台背面の地盤の空洞

図-7には、路肩からの浸水により地盤が緩み、路盤と路床の境界へ影響を及ぼしていると推定される記録である。深度1.8m付近は測線前後の記録と異なる強い反射波が得られ、浸水による反射と推定される。また上部に見られる波形の乱れは、この浸水により緩みが上部の路床部へと及んで空隙を生じさせていると推定される。

4.3 橋台背面探査

軟弱地盤上のボックスカルバートや橋梁構造物の

場合、これらの構造物取付け部近傍の路体・路床部に沈下や緩みが発生し、段差や踏掛け板のある場合にはその直下に空洞が生ずる誘因となる。

図-8に示した舗装構造における探査事例が、図-9である。深度70cm付近の橋台背面に強い反射波が存在し、空隙と推定される。

このように電磁波レーダー探査法により、舗装下の空洞や路盤中の埋設物の把握や、空洞発生の前兆である緩み等の変状についても推定されるまでに至ってきている。

5. おわりに

電磁波レーダー探査手法は送信周波数帯域が高いため、ほかの探査手法と比べて精度も高い。また連続データがリアルタイムで得られるので、鈴木⁴⁾が示しているように適用範囲が広く、近年では遺跡⁵⁾探査やトンネル覆工厚および背面空洞探査等にも適用されており、今後多くの土木分野で使用されるものと考えられる。

探査結果の良否は特にアンテナ部が大きくかわっており、探査目的と埋設条件を十分に検討考慮して、適切なアンテナを選択するとともに、収集されたデータから適切な情報を取得するための解析処理システムの構築と運用が要求される。今後とも、探査機能およびソフトの開発が望まれる。

参考文献

- 1) 小池賢司：路面下の空洞調査，地質と調査，No. 2，pp. 31～37，1993.
- 2) C. Peter F. Ulriksen: Application of Impulse Radar to Civil Engineering, Lund University of Technology Doctoral Thesis, 1982.
- 3) 保国光敏・阿部 裕・土弘道夫・五十嵐寛昌：電波探査技術を利用した浅層地盤調査法，土と基礎，Vol. 33，No. 7，pp. 33～36，1982.
- 4) 鈴木 務：電波による埋設パイプの探知，地質と調査，No. 3，pp. 25～30，1993.
- 5) 峠 美穂・坂山利彦・兼崎幸雄：物理探査による遺跡調査，全地連「技術フォーラム'93」講演集，pp. 57～58，1993.

(原稿受理 1993.12.28)