

鉄筋布設域への路面下空洞調査(地中レーダ探査)の適用事例

応用地質(株) ○上田 拓哉, 橋本 裕司, 村岡 直

1. はじめに

路面下空洞調査は、地中レーダ技術を用いて、地中の空洞発生状況を把握することを目的とする調査である。地中レーダ探査では、アンテナから電磁波を地中に放射し、その反射波を解析することで、地中の空洞を非破壊で可視化する事が可能である。

本稿では、築約50年が経過し、吸出しによる陥没が懸念される港湾施設のエプロンに対して、路面下空洞調査を実施した事例を紹介する。

本対象地には鉄筋が等間隔に布設されており、電磁波を用いる本手法では、鉄筋による電磁波反射像の影響により空洞からの反射像を見逃す恐れがあった。そこで本事例では、距離方向の移動平均値を各サンプル値から取り除く処理(以下、背景除去処理)により、空洞からの電磁波反射像を強調し、抽出する手法を取った。

本事例は、鉄筋コンクリート版下に発生する大規模な空洞による陥没被害を未然に防ぎ、施設維持管理を効果的に進めていくために非常に重要であると言える。

2. 調査の概要

(1) 地中レーダ探査原理

地中レーダ探査では、アンテナから電磁波を路面下に向けて放射し、誘電率が異なる媒質の境界により生じた反射波を受信する。図-1に異なる媒質による電磁波の透過と反射の様子を示す。電磁波が境界面に入射する場合の反射係数 R は以下の式で書ける¹⁾。また、表-1に主な材料の比誘電率の値を示す。

表-1と式-(1)より、空気の比誘電率が1であるため、空洞箇所において反射係数の絶対値が最大になることがわかる。また、空洞上面からの反射係数は必ず正になることがわかる。これらの特徴を基に、空洞の抽出を行う。

$$R = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

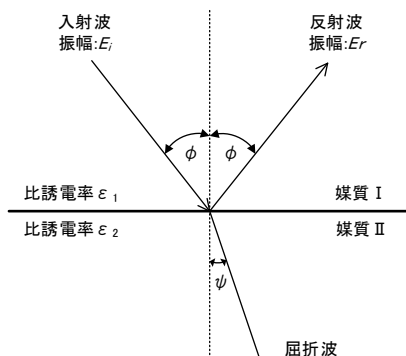


図-1 境界面における電磁波の反射と透過のイメージ¹⁾

表-1 主な材料の誘電率および比誘電率¹⁾

材料名	比誘電率	比抵抗(Ωm)	備考
アスファルト	4.5~9	数1000~数10000	材質、含水条件により変化
コンクリート	5~7	50~200	同上
砕石	7.5~18	10~数1000	種別、含水条件により変化
土砂	10~36	20~数1000	同上
空気	1	∞	

なお、鉄筋(金属)の比誘電率は無限大であり、式-(1)より反射係数は1となる。そのため、アンテナから放射した電磁波は鉄筋の上面で全て反射し、記録上に非常に強く現れ、空洞抽出の妨げとなる。対象としたエプロン舗装版の構造を、表-2に示す。

表-2 エプロン舗装版の構造

コンクリート厚	約0.20m
鉄筋間隔	約0.15m
鉄筋構造	1重、格子状(径は不明)

(2) 現地測定方法

地中レーダ探査の測定模式図を図-2に示す。測定時は、現地状況を考慮し、設定した探査測線位置に巻き尺を張り、それに沿って測定を実施した。使用した機器や測定条件を表-3に示す。

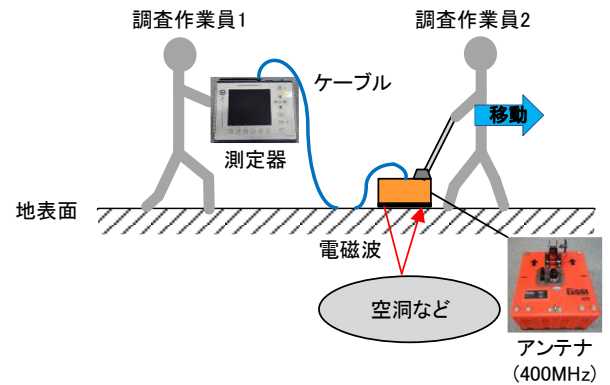


図-2 地中レーダ探査模式図

表-3 測定機器および測定条件

名称	仕様、測定条件など	製作会社	
測定器(SIR-3000)	スキャン	:100scan/m	GSSI
	フィルター	:FIRフィルター100MHz, 800MHz	
	表示部	:8.4in カラーTFT液晶	
	プロセッサ	:32bit RISC 206MHz	
	寸法	:315×220×105mm	
アンテナ(Model-50400S)	重量	:4.1kg(バッテリー含む)	GSSI
	中心周波数	:400MHz	
	寸法	:30×30×20cm	
	重量	:4.6kg	

(3) 背景除去処理の実施

本調査地の鉄筋は、格子状に等間隔で布設されているため、電磁波反射像は、同様に等間隔で現れると推定された。そこで、距離軸方向の移動平均値を計算し、各サンプル値から取り除くことにより、規則的に現れる鉄筋による電磁波反射像の影響を軽減し、空洞のように局所的に現れる電磁波反射像を強調する処理を行った。

背景除去処理のイメージを図-3の記録断面模式図に示す。上図が背景除去処理前の記録断面図、下図が背景除去処理後の記録断面図である。

図-3内の距離軸方向に等間隔に並ぶ赤線および水平方向の青線は、布設されている鉄筋による電磁波反射像および多重反射像を示す。これらが背景除去処理後には軽減され(図中では色を薄くして表現)、空洞による局所的な反射像が強調されることを示している。

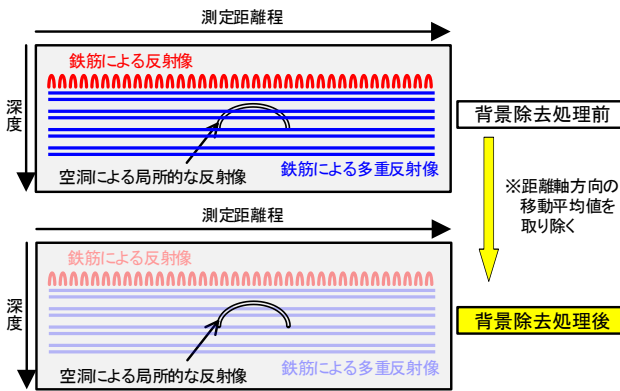


図-3 背景除去処理のイメージ

3. 調査結果

背景除去処理の適用結果(地中レーダ記録断面図)を図-4に示す。図-4の浅部に見える、上に凸状の白色の反射(約0.15m 間隔)が鉄筋による電磁波反射像であり、深部まで続く水平方向の反射が多重反射像である。また、黄色い枠で囲んだ幅約5m の上に凸状の電磁波反射像が空洞によるものである。これを見ると、処理前では鉄筋による影響で不明瞭であった記録が、処理後は強調できていることが分かる。特に水平方向の多重反射像は、ほぼ除去できている。

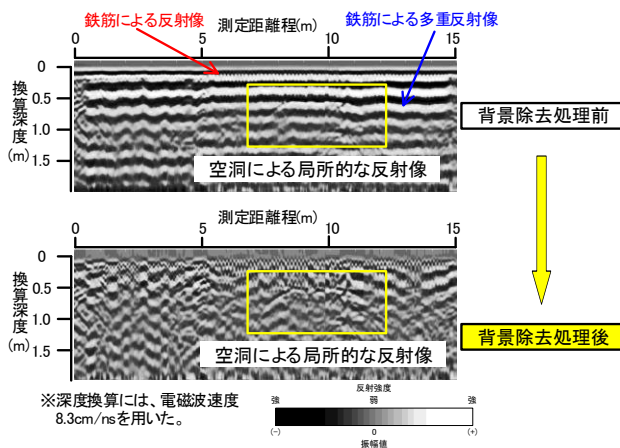


図-4 測定記録例

本地点について、削孔および孔内カメラ観察を実施したところ、空洞の存在を確認した。孔内カメラの観察結果(孔壁展開画像等)を図-5に示す。

本事例では、布設間隔約 0.15m の鉄筋について背景除去処理を実施し、空洞による電磁波反射像を抽出したが、鉄筋による影響はその布設間隔や径、また用いるアンテナの種類に依存することに留意する必要がある。また、本事例では鉄筋による多重反射像内の異常信号を抽出したが、浅部の鉄筋そのものの反射像内にある信号を抽出できるかについては今後のノウハウ蓄積が必須であると考える。

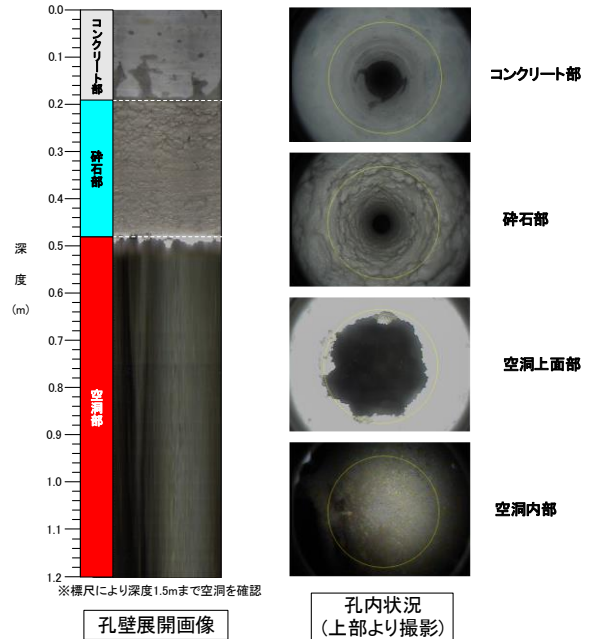


図-5 孔内観察結果

4. まとめ

本稿では路面下空洞調査(地中レーダ探査)の鉄筋布設域(港湾施設のエプロン)への適用事例を紹介した。

解析過程で背景除去処理を適用し、鉄筋による電磁波反射像を軽減し、空洞による電磁波反射像を強調することで、調査地内(測線長 19.6km)で 26 箇所の空洞を確認した。多くのエプロン舗装には鉄筋が布設されているため小規模な陥没が発生する可能性は低いものの、空洞が大きく成長した場合、大きな陥没が突然発生するリスクは高いと言える。そのため、これまで適用が困難であると考えられてきた鉄筋コンクリート版下の路面下空洞調査に背景除去処理を適用することは、大規模な陥没被害を未然に防ぎ、施設維持管理を効果的に進めていくために非常に重要であると言える。さらに、本事例の様なノウハウを継続的に蓄積し教師データとすることで、AI(人工知能)による自動抽出の発展にも寄与できると考える。

《引用・参考文献》

1) 路面下空洞探査車の探査技術・解析の品質確保コンソーシアム編:路面下空洞探査技術マニュアル(案), p.3, 2017.9