

◆ 新しい探査技術特集 ◆

レーダによる地中構造物周辺地盤の空洞探査への適用性

森 芳徳* 大下武志** 市村靖光***

1. はじめに

さきの兵庫県南部地震においては多くの土木構造物が被災し、下水管路をはじめとする地中構造物及びその周辺地盤においても損傷・変状が確認されており、これらの復旧に当たっては被災度を正確に把握しそれに応じた補強対策等を施す必要がある。また、これらの地中構造物は、老朽化や施工不良、周辺地盤の圧密沈下によりクラックや継ぎ手部での目地切れが発生し、管内への地下水の流入(不明水)をはじめ、周辺土砂の管内への堆積、流入土砂による流下能力の低下等の事例が数多く見られる。最終的には、土砂の流入により周辺地盤に緩みや空洞が発生し路面陥没を引き起こしている事例もある。このため、このような地中構造物周辺地盤に発生する空洞を小規模の状態で早期に発見し、空洞充填等の補修対策を施す必要がある。

本稿では、電磁波レーダ(以下、レーダと称す)を用いてヒューム管およびボックスカルバート内から構造物外周地盤に設置した空洞の探査実験を行い、地中構造物内から外周地盤の変状等を非破壊で調査する手法について検討した結果を報告する。

2. 空洞探査技術の現状と問題点

これまで、地中構造物周辺の地盤変状や空洞を調査するには、目視やテレビカメラなどで表面を観察し、コンクリートの亀裂や剥離の状況から周辺地盤の変状を間接的に推定する方法が用いられてきた。しかし、このような方法では構造物自体の健全性はある程度判断できるものの、周辺地

盤の状態を含めた構造物全体の健全性を把握することは難しく、非破壊的な手段で空洞や緩み、あるいは水みちを精度よく探査する方法の確立が望まれていた。

土木研究所では、これまで河川構造物である樋管の外周地盤に発生する空洞・水みちに対するレーダ探査の検討^{1),2)}を行ってきており、その基礎的な実験の結果から表-1に示すような見解を得ている。しかしながら、実現場で用いられている樋管等の地中構造物は、そのほとんどの鉄筋間隔が200mm以下のダブル配筋であるため、これまで用いられてきた既存のレーダ装置では、アンテナから送信した電磁波が鉄筋にあたり反射波と合成される共振現象や構造物内の伝搬による減衰を考慮した対策が必要であった。これらの結果を踏まえ、その後、(財)国土開発技術研究センターにおいて河川構造物の非破壊探査システムの検討³⁾が行われ、レーダアンテナを改良することによって鉄筋間隔が125mmの鉄筋コンクリート(RC)構造物においても空洞探査が可能であることが確認されている。

今回は、鉄筋の影響を最小限に抑え背面の地盤の情報を有効に抽出するために、高周波数で放射角度が狭くなるようにアンテナを改良し、水中でも探査可能なように防水機能も高め、模擬地盤において空洞探査実験を行い、その適用性を確認した。その結果、鉄筋間隔が狭く軸筋及びらせん筋を有するヒューム管、あるいは底版に厚みのあるボックスカルバートであっても、電磁波を効果的に透過させ背面の空洞を捉えることが確認できた。

表-1 既往の研究によるレーダの空洞探査への適用範囲^{1),2)}

中心周波数	構造物		
	鉄筋コンクリート床版(厚さ300mm程度)		
	鉄筋間隔(シングル)		鉄筋間隔(ダブル)
	200mm以上	200mm以下	200mm
500MHz	○	×	×
900MHz	○	×	×
1GHz	◎	○	×

※ ○: 探査可能、◎: 条件により可能、×: 不可能

3. 電磁波レーダとは

3.1 探査原理

図-1は、レーダによる空洞探査の概念を示したものである。地上から地中に向けてパルス波を発射すると、一部は地表面で反射し、その他は減衰しながら地中を進んでいく。パルス波は均質な媒体中を通過しているときは、減衰するものの反射は生じない。しかし、異なった物質の境界面に達したときには、物質の比誘電率の差に比例して反射する。レーダは、このような性質を利用したもので、1秒間に約50,000~100,000のパルス波を発射し、反射波の強さと時間遅れを測定するものである。

電磁波の伝搬速度は、伝搬する媒体の比誘電率により異なり式(1)で表される。また、算出した伝搬速度と反射波の到達時間を測定することにより、式(2)に示すように反射境界面までの深度を知ることができる。表-2に代表的な媒体の比誘電率を示す。

$$V = C / \sqrt{\epsilon\gamma} \quad (1)$$

$$D = V \times T/2 \quad (2)$$

ここで、

V : 電磁波の媒体中の伝搬速度 (m/sec)

C : 電磁波の空中伝搬速度 (m/sec)

$\epsilon\gamma$: 媒体の比誘電率

D : 反射面までの深度 (m)

T : 反射波の到達時間 (sec)

図-2に地上でレーダを走査した場合の計測状況と反射波の並びの概略図を示す。レーダ探査は、

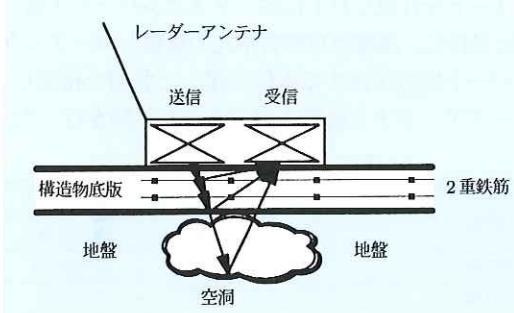


図-1 レーダによる空洞探査の概念

表-2 レーダ探査における代表的媒体の比誘電率

区分	空気	氷	コンクリート岩	舗装+土	未舗装畑土	水
比誘電率	1	3	6~9	11~21	24~40	81

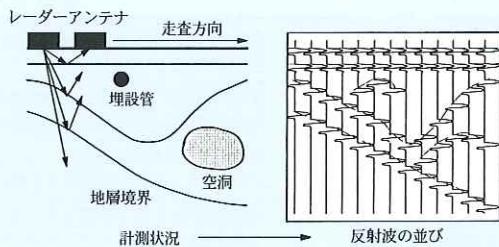


図-2 計測状況と反射波の並び

作業員が入れない断面の小さい構造物内でも、コンパクトなレーダアンテナを挿入・移動させながら、地表において電磁波の送信受信を高速で行い、連続して計測できる方法である。この結果、各点で求められた反射波の並び(反射面)を表した断面図から、反射面の形状や連続性を把握することができ、これらのことから地下状況を探ることが可能となる。一般的には、各反射波の振幅の大きさを色分けし、カラー画像としてディスプレイに表示される。

3.2 探査特性

表-3にアンテナから地中に向けて送信する周波数、送信出力、探査深度および分解能の関係を示す。レーダの探査深度は、アンテナの周波数に依存する。一般に、周波数が低いと減衰が少なく探査深度が深くなるが、分解能は低下する。一方、周波数が高いと分解能が増し精細な画像を得ることができるが、減衰が大きく深い位置まで探査が

表-3 レーダの探査特性

周波数	低 (100MHz)	高 (1GHz)
送信出力	高 (200Vpp)	低 (20Vpp)
探査震度	深 (3~4m)	浅 (0.5~1m)
分解能	低	高

表-4 アンテナ選択の目安

探査物標	埋設震度	適合アンテナ
地中埋設管	0.5 ~ 2m	300 ~ 500MHz
	2 ~ 10m	80 ~ 120MHz
路面下空洞	舗装直下	500 ~ 900MHz
	1 ~ 2m	300 ~ 500MHz
地盤、岩盤	1 ~ 2m	500MHz
	2 ~ 5m	300MHz
	5 ~ 10m	80MHz
コンクリート内鉄筋	5 ~ 30cm	1,000MHz
	10 ~ 50cm	900MHz
舗装厚	5 ~ 30cm	1,000MHz
	10 ~ 50cm	900MHz

表-5 データ処理の概要

差分処理	全波形あるいは差分対象箇所の波形を平均化し、標準波形を作成し、これを各波形から差分する。現場で探査しながらリアルタイムに実施可能である。
フィルター処理	探査対象物に影響される周波数帯域と周辺地盤に影響される周波数帯域が異なる場合、抽出したい反応の周波数帯域以外の周波数成分を除去する。
デコンボリューション処理	記録波形を時間幅の短いパルス波形に圧縮することにより、反射波がより纖維かつ強調されて表現され、リング（画像上を横に連続する縞模様）も除去できる。
2チャンネル計測による相互差分処理	空洞が存在すると予想される部分と存在しにくい部分を走査し、お互いを差分することにより、構造物の継ぎ手部からの反応や通常の差分処理では除去が難しい不連続反応について除去できる。

できない。以上のような特性を有しているため、実際にレーダ探査を行う場合には、表-4に示すように探査対象物とその埋設深度によってアンテナを選択する。

3.3 データ処理

測定した波形あるいは画像を表-5に示す処理を加えることにより、空洞部の反応をより鮮明に捉えることができる。これらの各手法は、今回の実験において実際に適用した手法であるが、これ以外にもウェーブレット処理やマイグレーション処理⁴⁾などが一般的に適用される。

4. 空洞探査実験

以上のレーダの特性を鑑み、鉄筋径が3~4mmと小さく、厚さも50mm程度と薄いものの、鉄筋ピッチが100mm以下と非常に密な鉄筋間隔であるヒューム管と、鉄筋間隔はヒューム管より粗いものの、底版厚が300mm程度と厚みのあるポックスカルバートを対象に、各々の外周地盤に設置した模擬空洞を構造物内から探査する実験を行った。

4.1 実験方法

表-6に実験に用いたレーダアンテナの仕様を、表-7にヒューム管、表-8にポックスカルバートの仕様を各々示す。レーダアンテナは、送信周波数の変更が可能であり、河川構造物の樋門や樋管等の鉄筋コンクリート構造物上から構造物直下の地盤の状況を調査するために開発された装置である。

表-6 レーダアンテナの仕様

形状	三角形ダイポール
材質	アルミニウム製鋳物
シールド	フェライト電波吸収体強化
重量	1.5kg
周波数可変	∞~1,500MHz
出力可変	20Vpp~200Vpp
その他 付加機能	STC機能、防水型、 出力ビームの狭角化

る。また、特に鉄筋による共振現象に対応するために放射角を狭くできるように工夫し、水路内計測を想定しているため完全防水型となっている。

ヒューム管はφ400mmでらせん筋間隔が各々65mmと35mmのB1種とB2種の2種類を対象とし、各々2本(2.5m×4本=10m)を連結した。実験地盤は、図-3に示すように川砂地盤中に模擬空洞を設置した上にヒューム管を4本設置し、半分埋没するまで周辺を川砂で覆った。模擬空洞は、EPS(発泡スチロール)を用い、形状は幅350mm×長さ400mm×高さ180mmとし、ヒューム管の継ぎ手部からの影響を避けるため、管の中央部に設置した。また、レーダアンテナと管底部に隙間が生じ境界面での反射が予想されるため、ダンパー材としてヒューム管と同質のモルタルを設置した状態と設置していない状態の2条件で探査を行った。

ポックスカルバートは、内径1,100mmで底版の厚さが150mm、鉄筋間隔は主鉄筋間隔が100mmと150mmの2種類を各々2個準備した。実験地盤は、図-4に示すように粘性土地盤中にEPS製の三角柱状の模擬空洞を2種類のポックスカルバートの連結部分中央に設置し、厚さ150mmの基礎コンクリートを打設した上にポックスカルバート4個を据え付けた。地盤は自然含水比の状態とポックスカルバート底版上部まで水位を保った状態を再現し、レーダアンテナを底版上部で走査し実験を行った。

表-7 ヒューム管の仕様

管種	内径×管長	鉄筋ピッチ	
		縦筋	らせん筋
B1種	φ400×2,505	113 (φ4)	65 (φ3.2)
B2種			35 (φ4)

表-8 ポックスカルバートの仕様

タイプ	内寸 (幅×高さ×長さ)	鉄筋間隔	
		鉄筋	主筋
①	1,100×1,100×2,000	258 (φ6)	150 (φ7.4)
②			100 (φ7.4)

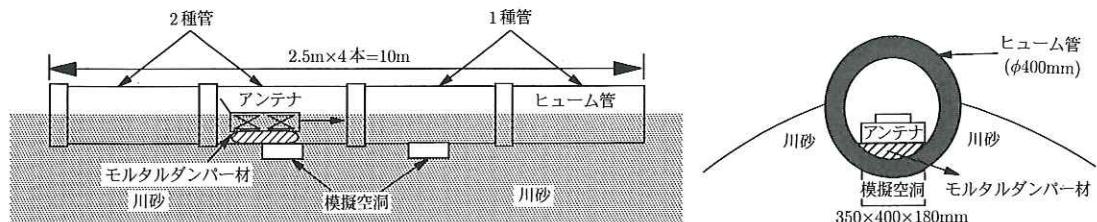


図-3 実験地盤(ヒューム管)

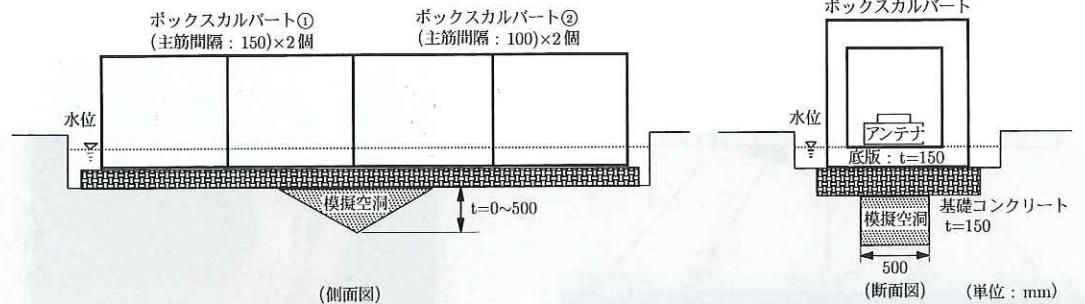


図-4 実験地盤(ボックスカルバート)

表-9 実験ケース

ケース	構造物	中心周波数	備考
1	ヒューム管	500MHz	ダンパー材 モルタル
2		1GHz	
3	ボックスカルバート	500MHz	ダンパー材 無
4		1GHz	
5	ボックスカルバート	500MHz	水位 無
6		1GHz	
7	ボックスカルバート	500MHz	水位 有
8		1GHz	

表-9に実験ケースの一覧を示す。レーダの中心周波数は、これまでの実験結果を参考に500MHzと1GHzの2種類を採用した。写真-1にボックスカルバートでの実験状況を示す。

4.2 実験結果

4.2.1 ヒューム管周辺空洞探査実験

図-5にケース2の無処理画像とフィルター処理および差分処理した探査画像を示す。強い反射波ほど赤く、弱くなるほど黄→青→白に表示される。以下に鉄筋ピッチ、中心周波数、ダンパー材の各要因の影響についての考察と2チャンネル計測による相互差分処理の効果について述べる。

(1) 鉄筋ピッチの影響

鉄筋ピッチの粗いB1種であれば明確に空洞からの反射波が捉えられることが確認できているが、鉄筋ピッチの細かいB2種のケースでは、空洞からの反射波を明確に捉えているとは言い難く、空

洞の存在を検知することは難しいと考えられる。

(2) 中心周波数の影響

中心周波数が1GHzと500MHzの場合では、1GHzの方が500MHzより空洞からの反射パターンが良好であった。これは、ヒューム管の断面が薄いため、高周波であっても構造物による減衰が小さく、また鉄筋による共振にも強く影響されず、空洞を捉えることができるためと考えられる。

(3) ダンパー材の影響

ダンパー材の有無に関わらずB1種管が対象の場合は空洞が確認できたが、ダンパー材を挿入したケースの方がより良好な画像データが得られた。これは、ダンパー材を使用するとその境界特性から伝搬減衰が減少し、信号レベルが向上するためと考えられる。

(4) 2チャンネル計測による相互差分処理

ヒューム管やボックスカルバートには必ず継ぎ手が存在し、これに影響された反応は必ず発生する。今回、空洞からの反応が明確に捉えられたB1種管を対象に、ヒューム管下に空洞がある場合とない場合において同様の計測を実施し、両者の相互差分解析を実施した。図-6に相互差分に用いた未処理画像とそれらを用いて差分を行った画像を示す。2チャンネル計測を想定した相互差分断面は、継ぎ手反応のみでなく、通常の差分処理では除去が難しいヒューム管自体からの反射波で不連

続に反応する波形についても除去することができ、2チャンネル計測による相互差分処理の有効性が確認できた。

4.2.2 ボックスカルバート周辺空洞探査実験

図-7にケース8の探査結果を示す。主筋間隔が150mmのタイプ①の部分ではデータ処理前の画像からでも空洞を明確に認識できた。主筋間隔が100mmのタイプ②ではフィルター処理と差分処理を行うことにより空洞を認識できた。実験前の

予測では、ボックスカルバートのように鉄筋間隔はヒューム管ほど密ではないが厚みのある構造物の場合、電磁波の特性からアンテナの中心周波数が低い500MHzの方が、構造物による減衰が小さく空洞からの反射パターンが良好になるものと考えられた。しかしながら、今回の実験結果では、中心周波数の高い1GHzのアンテナを採用し各種のデータ処理を行うことによって、より効果的に空洞からの反射パターンを認識できることが確認で

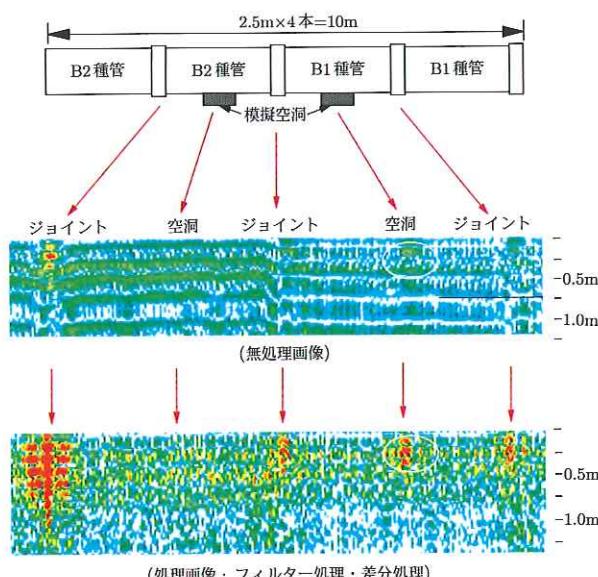


図-5 探査画像(ケース2,1GHzダンパー材有り)



写真-1 実験状況(ボックスカルバート内)

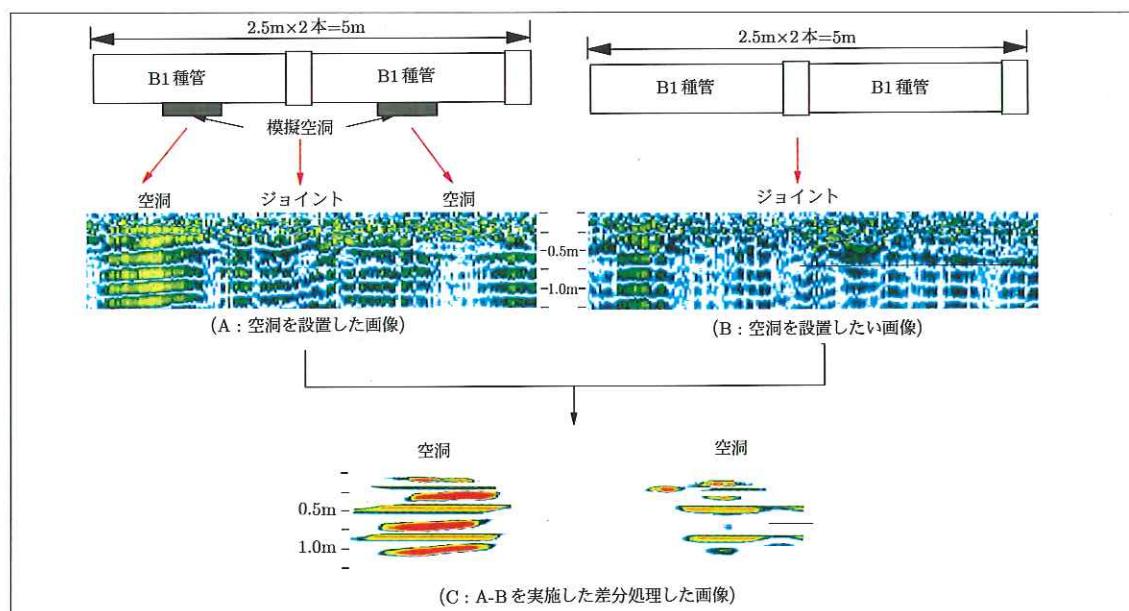


図-6 2チャンネル計測による相互差分処理

表-10 レーダによる地中構造物周辺地盤の空洞探査への適用範囲

中心周波数	RC構造物			
	鉄筋間隔(ダブル)		鉄筋間隔(シングル)	
	150mm(厚さ300mm程度)	100mm(厚さ300mm程度)	65mm(厚さ50mm程度)	35mm(厚さ50mm程度)
500MHz	○	×	○	×
1GHz	○	○	○	×

※ ○：探査可能、○：条件により可能、×：不可能

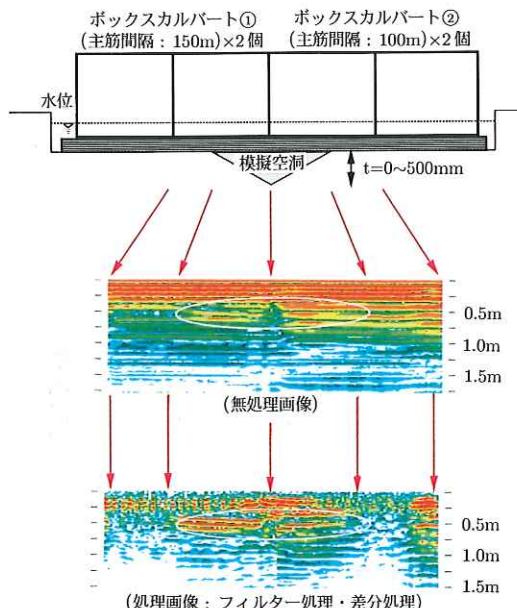


図-7 探査画像(ケース8,1GHz水位有り)

きた。また、周辺地盤が湿润している場合においても、構造物内の水を除去すれば検出性に大きな差異は見られなかったが、今回の実験では模擬空洞として誘電率が空気と同等のEPSを使用しており、実現場では空洞の中に水が満たされていることが予想されるため、今後の実験において検討する必要がある。

5. 今後の課題

以上の実験結果および既往の研究を整理し、レーダによる鉄筋コンクリート(RC)構造物周辺地盤の空洞探査の適用範囲を表-10に示す。本研究の結果、アンテナの改良や解析の工夫により、以前よりも狭い鉄筋間隔での探査可能性や実構造物への適用性が検証できた。しかし、これらの結果は、構造物の仕様が明確で地盤も均一であるような良好な探査環境での見解であり、実現場での適用範囲とは必ずしも同一ではないと考えられる。今後は、空洞が水で満たされた状態での実現場における適用性の確認を行うとともに、装置の自動化・システム化の検討、またデータ処理・解析技術面では、ニューラルコンピューティング等の手法を取り入れた解析手法を検討する必要がある。

また、本研究の成果を参考に、「地中レーダによる空洞探査の手引き(案)」を土木研究所資料第3547号⁵⁾の中にとりまとめている。

参考文献

- 長健次、苗村正三、境友昭：土木研究所資料第2762号、堤体の非破壊調査機器に関する調査、1989年2月
- 苗村正三、市村靖光、森芳徳：土木研究所資料第3333号、樋門樋管の空洞探査修補技術に関する調査、1995年3月
- (財)国土技術開発研究センター：河川構造物の非破壊探査システムの検討、1996年
- 物理探査学会：図解物理探査、p11、
- 塙田幸広、森芳徳、市村靖光：土木研究所資料第3547号、地中レーダの空洞探査への適用性とその評価に関する研究、1998年3月



建設省土木研究所
材料施工部
施工研究室研究員
Yoshinori MORI



同 施工研究室長
Takeshi OSHITA



同 施工研究室研究員
Yasumitsu ICHIMURA