

19. 歩道下空洞探査車の開発

国土交通省 関東地方整備局：田中 義光、持丸 修一、

*小澤 直樹

1. はじめに

社会資本整備の一環として、電気、ガス、上下水道などのライフラインの地下埋設が積極的に進められている結果、埋設物の施工不良、地盤沈下、老朽化などが原因と思われる空洞が生じ路面陥没が多発している。このため、国土交通省関東地方整備局関東技術事務所では、道路調査車（路面下空洞探査車）を開発し、平成2年度より路面の空洞調査を実施し、路面陥没の防止に大きく貢献している。

一方、歩道部においても、過去に路面陥没が発生していたが、通行に支障のない程度のものであったことから、本格的な空洞調査は実施されていなかった。しかし、平成11年7月に都内の国道において歩道部に大規模な陥没（深さ約0.8m、幅1.2m、長さ2.4m）が発生し、歩道の安全かつ円滑な通行確保が求められるようになった。

本報告は、歩道部の空洞探査を効率的に行うため、路面下空洞探査技術（地中レーダー技術）を活用した歩道用の空洞探査車の開発内容について述べる。

2. 地中レーダーの原理

アンテナより放射された電磁波は、伝解する媒質中の電気的性質の違いによってその速度が異なるため電気的性質の異なる境界において反射波に時間的な遅れ（差）が生じる。

一般に物質中での電磁波速度は、空気中の秒速約30万kmに対し、1/3程度であることから物質中での電磁波速度を用いて時間を距離に変換すれば、実際の層状態が把握できる。

電磁波の反射強度は反射境界を形成する2つの層の比誘電率のコントラストの差異に依存するため全物質中最小の値をも

つ空洞（空气中）が地中にある場合、反射強度は非常に強くなる。また、電磁波は比誘電率の小さな物質から大きな物質に入射すると反射波の極性は反転（負の極性）する一方、逆に大きな物質から小さな物質に入射するときは極性は反転しない。このような電磁波の性質（強度と極性の特徴）を利用して

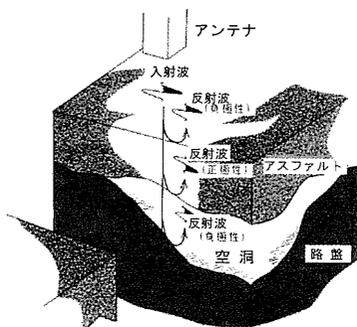


図-1 反射波の発生原理図

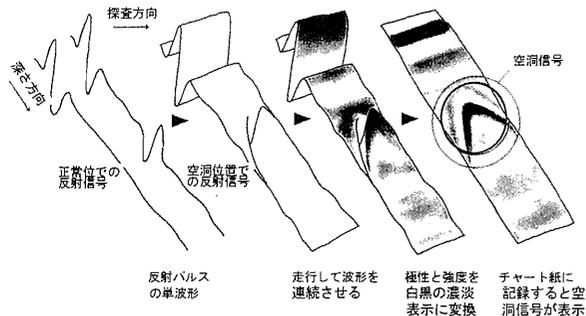


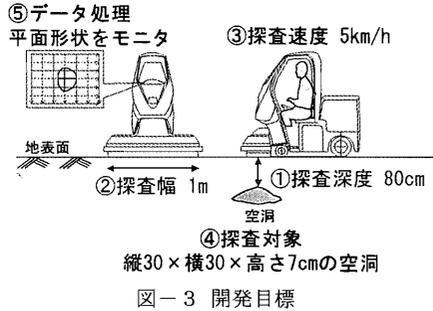
図-2 反射波記録表示

地中内部の判読を行う。図-1に反射波の発生原理図を、図-2に反射波の記録表示を示す。

3. 開発内容

3.1 開発目標

開発目標は、都内で発生した空洞を原因とする陥没事例より、歩道部において陥落の可能性がある空洞を発見できるよう①探査深度：80cm、②探査幅：1.0m、③探査速度：5km/h、④探査対象：30×30×7cm以上の空洞、⑤データ処理：空洞の平面形状をモニターできることとした（図-3参照）。



3.2 要素試験

3.2.1 探査能力試験

探査能力試験は、定量的な探査が行くとともに、地中レーダーの基本スペックを決定するために関東技術事務所構内において歩道下に設けられた疑似空洞及び埋設配管を利用し実施した(写真-1、図-4参照)。レーダーは、一般的に発信周波数が高いと解像度が増すが、深さ方向の探査能力が下がることから2種類の中心周波数帯（500MHz, 800MHz）及びエアギャップ（路面とアンテナ



写真-1 疑似空洞・配管埋設状況

の間隔4cm, 8cm)を変化させ、探査能力の違いを確認した。周波数とエアギャップの組合せによる試験結果を表-1に、各周波数のチャート出力結果を図-5に、試験装置を写真-2に示す。試験結果より、周波数は500MHz、エアギャップは探査車の段差乗り越え等を考慮して8cmの組合せが最も良好な結果となった。

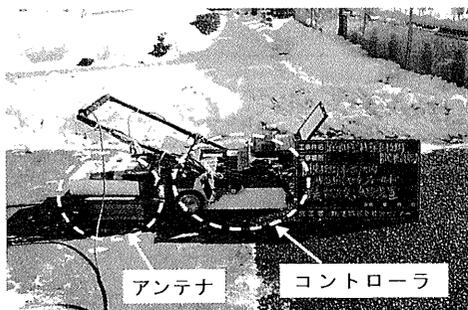


写真-2 試験装置

表-1 周波数、エアギャップ組合せ試験結果

アンテナ	エアギャップ	埋設物							
		V1	V2	V3	V4	P1	P2	P3	P4
ANT 500MHz	4cm	○	○	○	○	○	○	○	○
	8cm	○	○	○	○	○	○	○	○
ANT 800MHz	4cm	○	○	○	○	○	○	○	○
	8cm	○	△	○	△	△	△	△	△

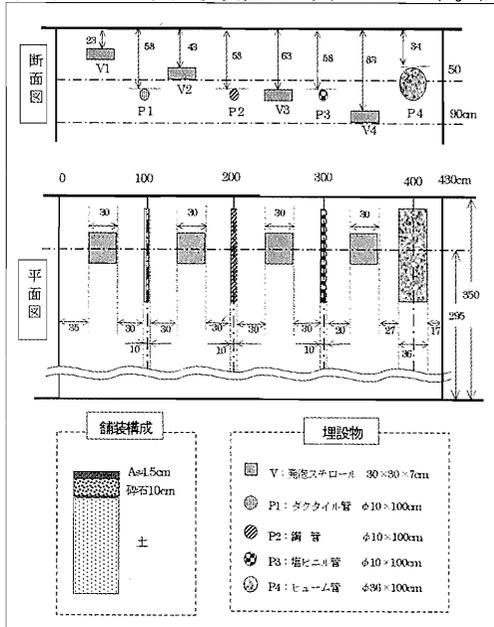


図-4 疑似空洞・配管レイアウト

○：明確に検知可 △：検知可

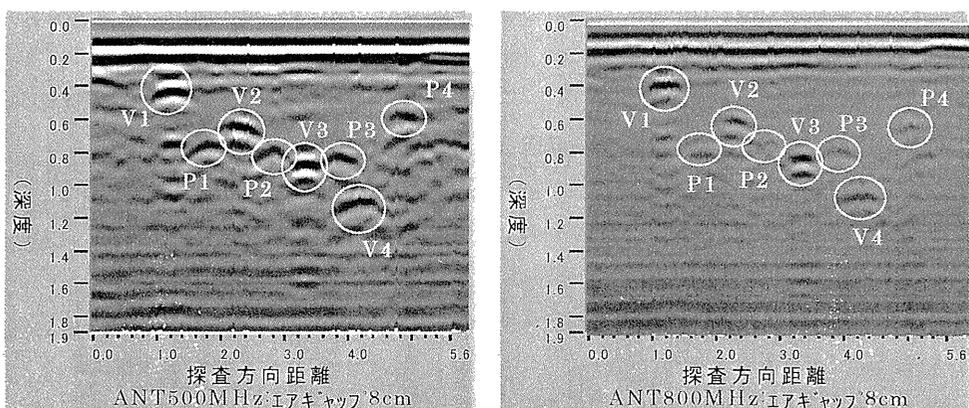


図-5 エアギャップ8cmにおけるチャート出力

3. 2. 2 3 測線同時測定基礎試験

開発目標である縦30cm、横30cmの空洞を高精度にモニターするために、最適なアンテナ間隔（以後「測線間隔」という）を決定するための試験を行った。

①測線間隔試験

測線間隔試験は、縦30cm×横30cmの空洞を2つのアンテナを使って検知する試験で、2つの測線間隔Xは、30cm、40cm、50cmとした（図-6参照）。表-2に測線間隔試験の結果を示す。反射部分比率(R)は、2つのアンテナがダイレクトにどの程度空洞を補足できたかを数値化したものである。試験結果より、アンテナの設置間隔は40cm以内が適当であることが明らかとなった。

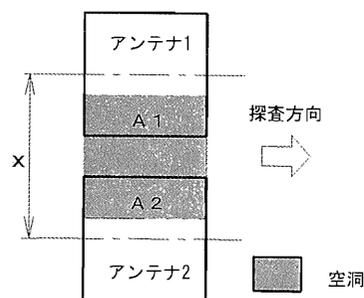


図-6 測線間隔試験平面概略図

表-2 測線間隔試験結果

測線間隔	アンテナ台数	反射部分比率	ANT500MHz	ANT800MHz
30cm	2台 (ANT2)	R= 100% r= 50%	○	○
40cm	2台 (ANT2)	R= 67% r= 34%	○	△
50cm	2台 (ANT2)	R= 34% r= 17%	×	×

R：アンテナ2台による反射部分比率 r：アンテナ1台分の反射部分比率

○：明確に検知可 △：検知可 ×：検知不可

②平面処理試験

従来の路面下空洞探査ではチャート出力による断面的な状況把握が一次探査結果とされていたが、本開発では3つのアンテナにより得られる3データを合成し、計測距離、深度、探査幅の要素で3次元データを形成し、任意の深度における対象物の平面形状を把握することを可能とした2次元表示処理ソフトウェアを開発した。ここで3つのアンテナを使って得られる3データを合成し、平面形状を把握するとともに測線間隔と空洞に対するアンテナの通過位置の違いによる処理能力を判定する試験を行った。

図-7、図-8に、500MHzによる疑似空洞V1の2次元処理結果を示す。縦断方向のデータ処理単位は、高精度な処理を行うため4cm間隔とし、図中における色分けは反射電波の強いもの（空

洞信号中心) から赤、黄、白、グレー、黒と5段階で、25%づつ反射強度が弱くなることを示す。

試験結果としては、図-8に示すように2つのアンテナの間には空洞がある場合、横断方向は70cm以上となり実空洞(30cm)に対して大きめに表示されたが、開発目標となる30cmの空洞は間違いなく捉えることができ、十分実用に対応できるといえる。

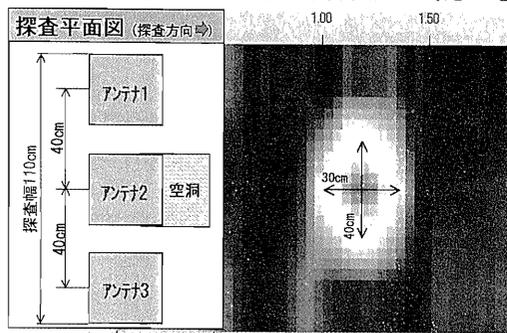


図-7 2次元処理データ(アンテナ直下に空洞)

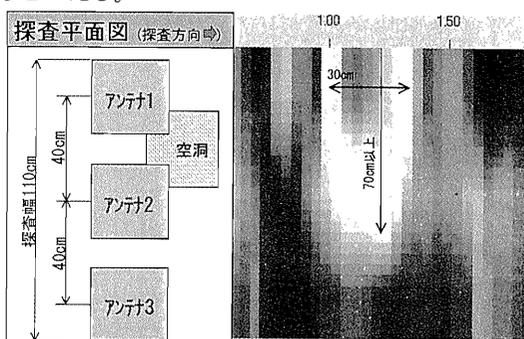


図-8 2次元処理データ(アンテナ2台中間下に空洞)

3. 3 歩道下空洞探査車(実機)の製作

要素試験の結果を踏襲し、歩道下空洞探

査車を製作した。

写真-3に今回製作した歩道下空洞探査車を、表-3に基本仕様を示す。



写真-3 歩道下空洞探査車

表-3 基本仕様

①車面形式	搭乗式電動四輪車
②探査方式	電磁波地中レーダ方式
③地中レーダ	3台一体型と2台一体型(中心周波数500MHz)
④信号処理機器	地中レーダで収集したデータを収録・表示する機器
⑤探査幅	1.0m(3台一体型の場合)
⑥探査速度	5km/h(自走式)
⑦最大探査深度	0.8m以上
⑧探査能力	30cm(縦)×30cm(横)×7cm(厚さ)以上の空洞
⑨駆動電源	シール鉛蓄電池(車両駆動部)、発電発電機(探査装置部)
⑩連続走行距離	25km以上(速度5km/h、平坦路)
⑪連続走行駆動時間	7時間以上
⑫登坂能力	8%以上
⑬溝乗り越え幅	100mm
⑭最小回半径	2.1m以下
⑮車両総重量	350kg未満
⑯車両寸法	全長1950mm、全幅1180mm、全高1000mm
⑰安全装置	歩行者等に注意を促すための警告音と回転灯。
⑱アンテナ懸架装置	ベース車両と地中レーダの3台一体型と2台一体型が 取付・取外可能とし、路面の不陸に対する回避装置。
⑲探査仕様方法	3測線又は2測線同時測定。
⑳マーキング装置	風化型チョークを用いた自動マーキング機構を備えた装置。

3. 4 構内試験

関東技術事務所構内において歩道下空洞探査車(実機)で実施した各試験結果を以下に示す。

3. 4. 1 実機による探査能力試験

本試験では、実機により要素試験結果を再確認するために実施した。

アンテナ3台を装着した歩道下空洞探査車を使い空洞試験フィールドにおいて試験した結果、アンテナ3台による相互干渉なく全ての擬似空洞および埋設管を明確に確認できた。図-9に試験結果データ(チャート出力)を示す。また、深度10cm毎に2次元処理の結果を図-10に示す。擬似空洞V1、V2、V3、V4、埋設管P1、P2、P4は明確に表示されたが、P3(塩化ビニル管)は明確には表示されなかった。これは、P3が擬似空洞や金属など他の埋設物と比べ反射信号が弱いためと考えられる。しかし、P3のように反射が弱いものに対しては、単独に抽出し表示濃度を上げることにより十分に確認ができると考えられる。

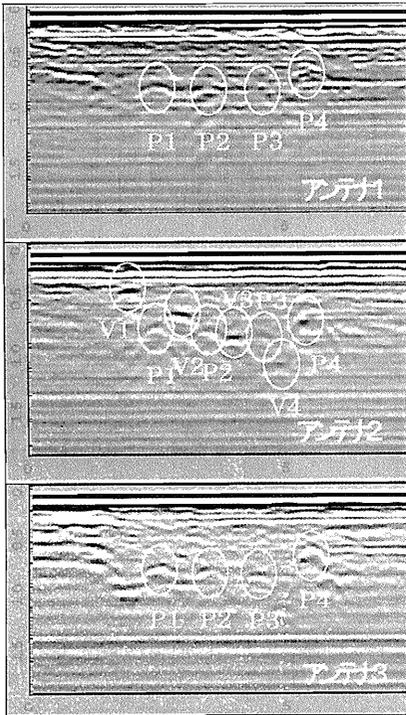


図-9 試験結果データ (チャート出力)

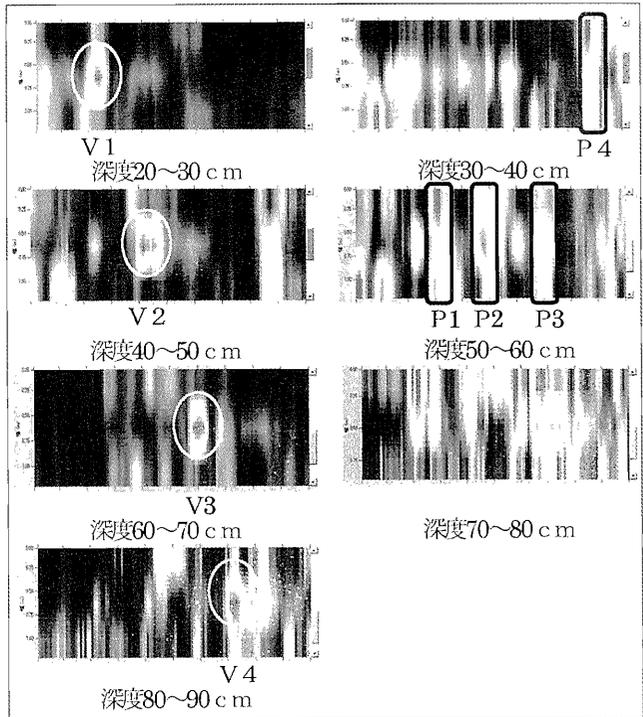


図-10 2次元処理結果

3. 4. 2 走行性能試験

本試験は、実際の歩道上における探査車の機動・操作性を確認するために実施した。

歩道の傾斜面走行試験では、勾配10%においても走行が可能であり段差の乗り越えでは84mm以下の段差であれば、アンテナが接触せずに乗り越えが可能であった。

実際の歩道上には、二輪車、植樹帯、支柱等の障害物が多く、探査できる範囲を確認するため、障害物回避試験を行った。植樹帯を擬した試験フィールドにおいて4条件による試験を実施した結果、表-4の調査可能比率から分かるようにアンテナ3台一体型の方が、探査可能面積が大きい。

図-11に障害物回避試験フィールド、表-4に障害物回避試験結果を示す。

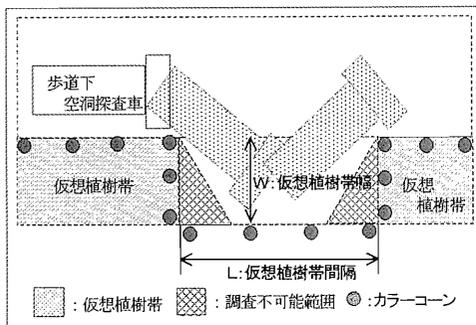


図-11 障害物回避試験フィールド

表-4 障害物回避試験結果

フィールド 条件	仮想植樹帯			調査可能面積 (㎡) / 調査可能比率 (%)	
	間隔: L (m)	幅: W (m)	調査面積 : S (㎡)	2台一体型	3台一体型
A	3.0	1.0	3.0	1.05 / 36	1.45 / 48
B	3.0	1.5	4.5	1.10 / 26	1.50 / 33
C	5.0	1.0	5.0	3.10 / 64	3.40 / 68
D	5.0	1.5	7.5	4.60 / 62	4.95 / 65

3. 5 現場試験

3. 5. 1 空洞判定能力試験

東京国道工事事務所管内で発見された3箇所の空洞を対象に、事前に行われたハンディ型レーダー及び開削による調査結果と歩道下空洞探査車による調査結果との比較を行った(写真-4参照)。

調査箇所No. 3における2次元処理の結果、図-13に示すように空洞は縦横ともに0.7mの広がりをもつ形状であると推測され、平面的な空洞寸法はハンディ型レーダー及び開削による調査結果と比較すると若干大きめではあるが近い値が確認された。ただし、深度については他の2箇所同様20cm程度の差があり、舗装の誘電率が要因とされる誤差と考えられ今後の検討課題ともされる。

以上の比較結果より、歩道下における空洞等の寸法、形状など概略的な把握は歩道下空洞探査車による調査で十分対応できるものと考えられる。No. 3におけるハンディ型レーダーによる調査結果を図-12に、歩道下空洞探査車による2次元処理結果を図-13に、各調査データの比較結果を表-5に示す。

表-5 各調査データ比較結果 (m)

調査箇所	データ種別	縦方向	横方向	厚さ	深度
No. 1	ハンディ型レーダー	0.41	0.47	-	-
	歩道下空洞探査車	0.20	0.30	-	0.20
	開削	0.41	0.47	0.11	0.17
No. 2	ハンディ型レーダー	0.90	0.50	-	-
	歩道下空洞探査車	0.70	1.00以上	-	0.60
	開削	開削調査時崩落により調査不可			
No. 3	ハンディ型レーダー	0.60	0.52	-	-
	歩道下空洞探査車	0.70	0.70	-	0.40
	開削	0.60	0.52	0.18	0.19



写真-4 現場試験状況

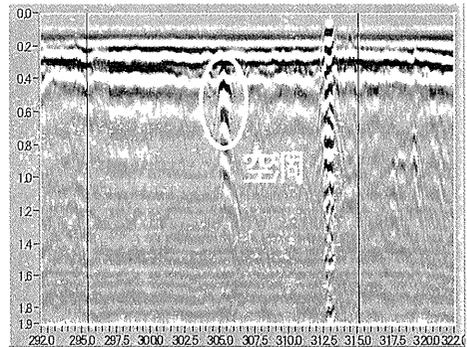


図-12 ハンディ型レーダー結果

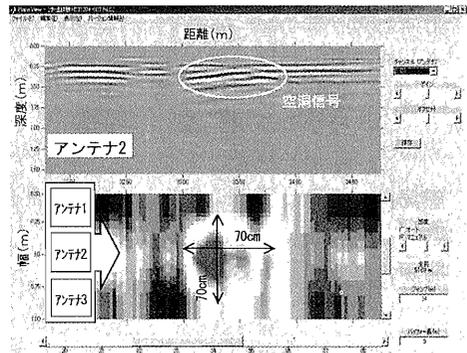


図-13 2次元処理結果

4. おわりに

歩道を対象とした歩道下空洞探査車を開発し、実機による実現場での試験を終了し、探査精度、操作性などその有効性を確認した。今後は、実現場での調査を実施し、多様な現場条件への適用性を実証する。また、調査結果については、既存の路面下空洞データベースへの統合を図るため、データベースソフトの改良を加え、スタンドアロン型を基本としたデータベースの構築を行い、同探査車の普及に努めるものである。