

## 9. 現道における路面下空洞（深層部）調査事例

### Two Case Studies of Survey of Deep Cavity under Road Surface

技術支援課 住吉卓、橋原正周

#### 1. はじめに

道路の陥没事故を未然に防ぐため、陥没の原因となる路面下の空洞を調査することは、道路管理において重要である。当センターでは建設局道路管理部からの依頼により、路面下深層部（本文では 1.5 m 以深を指す）の空洞調査に関して検討を行っている。

本文では、既報<sup>1)</sup>の屋外模型実験の結果を踏まえて選定した複数の探査手法を用い、現道で性能確認を行った 2 件の事例を報告する。

参考に、模擬空洞を探査する実験から各探査法の性能を評価した図<sup>1)</sup>に加筆して図 - 1 に示す。本文の事例で採用した探査法を赤いゴシック体や塗りつぶし丸 “ ” のプロットとしている。

#### 2. 事例 1

##### (1) 概要

都道で下水道工事（刃口推進工法、1350、土被り約 6 m）の施工中、切羽前面に空洞の一部が確認されたため、推進工事の完了後に空洞の規模、および周辺の空洞の有無を確認した調査である。

調査に用いた手法は次に示すとおりである。

##### ・一次調査：路上での物理探査による概略調査

###### 連続波レーダ探査

実験で深度 5 m までの探査性能が高かった手法である。

###### 反射法地震探査（P 波・S 波）

P 波計測は、実験で深度 5 m までの探査性能がやや高かった手法である。今回、併せて S 波計測

も実施した。

###### 表面波探査

実験では条件が適さなかった可能性があり、評価対象外としていた手法である。

###### 地中レーダ探査（中心周波数 350 MHz）

実験では最大探査深度が 2.5 m であり、本調査では浅層部の埋設管確認の目的で実施した手法である。

##### ・二次調査：サウンディング等による詳細調査

###### 土研式円すい貫入試験

NSWS（載荷重装置を空油圧システムとしたスウェーデン式サウンディング試験機の改良機）

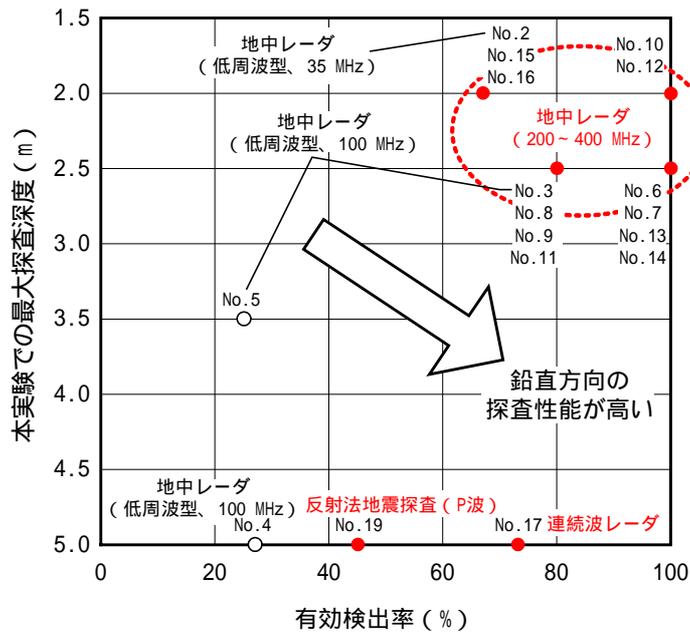
ボアホールカメラ調査（スチルカメラ、ビデオカメラ、レーザ距離計内蔵）

##### (2) 空洞周辺の状況

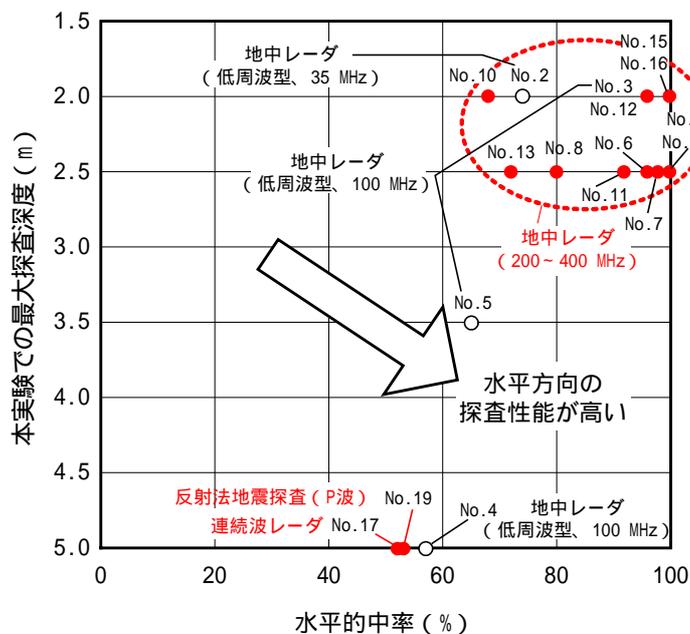
空洞周辺の平面図・断面図を、一次調査の測線位置と併せて図 - 2 に、空洞発見時の状況を図 - 3 および写真 - 1 に示す。

空洞近傍は、ア . 切羽部で目視確認された空洞の一部、イ . 切羽部で目視確認・排土された緩い地盤、ウ . 管下方に探針等で確認された緩い地盤、エ . 空洞の存在が懸念される領域から成っている。なお、地盤は主に関東ローム（埋め土または地山）であり、舗装厚は 50 cm（アスファルト厚 15 cm）である。

また、発見時の観察および下水道工事を所管する市の調査により、空洞は推進工事より相当以前に人工的に築造されたものと考えられた。



(a) 最大探査深度と有効検出率の関係



(b) 最大探査深度と水平的中率の関係

図 - 1 屋外模型実験の結果 <sup>1)加筆</sup>

### (3) 一次調査

一次調査として物理探査を実施した測線は、図 - 2 に示した測線 ~ である。連続波レーダ探査により、2つの縦断測線（測線 ・ ）および空洞部の横断測線（測線 ）を探査した。反射法地震探査（P波・S波）および表面波探査では、測線 のみ探査した。地中レーダ探査（中心周波数 350 MHz）は、前述のように埋設管確認の目的があったため、

すべての測線で探査した。

一次調査により得られた異常反応の位置とその推定内容を、図 - 4 および表 - 1 に一覧する。探査可能深度が浅い地中レーダ探査（350 MHz）では、空洞近傍に異常反応は検出されなかった。他の探査手法では、空洞の近傍で異常反応が検出された。空洞が推定された箇所に選定した二次調査の実施箇所 No. 1～5 も併せて図 - 4 に示す。

#### (4) 二次調査

二次調査は、まずサウンディング(土研式円すい貫入試験または NSWS)により、空洞の可能性がある自沈区間や地盤の緩み程度を確認した。次に、自沈区間でのボアホールカメラ調査により、空洞の有無や規模等を確認した。

調査箇所 No. 1~5(図-4)に対しサウンディングは、土研式円すい貫入試験を調査箇所 No. 1・4に、NSWSを調査箇所 No. 2・3・5に適用した。なお、ヒューム管の南側の地盤を確認する調査箇所 No. 5では、路上の制約から鉛直貫入が困難であったため、No. 1と同位置から斜め方向の貫入を行った。サウンディングの結果、自沈区間は調査箇所 No. 1・4の空洞相当位置のみで認められた。

そこで、調査箇所 No. 1にてボアホールカメラ調査を実施したところ、空洞の存在が確認され、その規模・形状等を図-5に示すように推定した。空洞の深度は5~6.5 m程度、形状は対称形でないが平面規模は直径にして2~3 m程度、概算体積(測量可能範囲のみ)は5.3 m<sup>3</sup>程度であった。

調査完了後、所管建設事務所が流動化処理土充てんによる復旧工事を実施したところ、その充てん量は8 m<sup>3</sup>程度であり、推定は妥当であったと考えられる。

#### (5) 探査法の評価

##### 連続波レーダ探査

今回用いた手法の中で、当該空洞の深度や平面延

長を最も的確に推定できた。一方、他の手法も同様であるが、緩み地盤(地層境界)など空洞以外の要因も異常反応として検出し、これらを明確に空洞と区別するのは困難であるため、二次調査による確認が必要である。

##### 反射法地震探査(P波・S波)

深度をやや浅く推定したが、当該空洞を検出できた。しかし図-4などで、例えば連続波レーダがR1・R2と別個の空洞として推定した範囲(ただし実際の空洞はR1位置のみ)を、一連の空洞P1として推定するなど、連続波レーダとの比較では検出精度が低かったと考えられる。

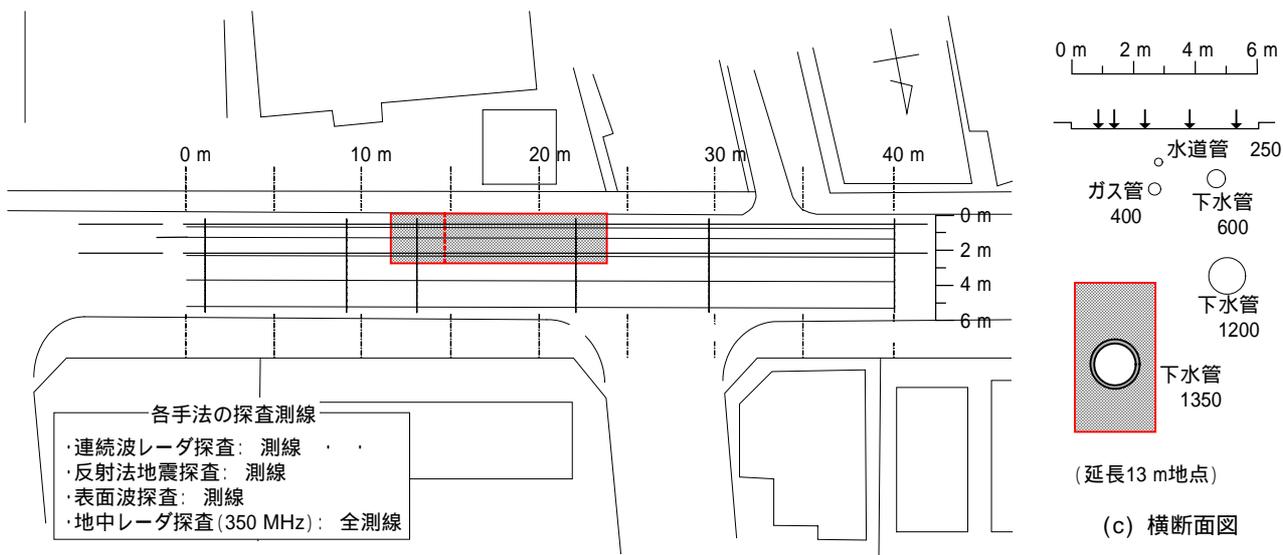
##### 表面波探査

当該空洞位置を含む範囲を異常反応H1(図-4など)として検出したが、今回は下水管の反応と推定している。空洞に起因する異常反応(表面波の低速度領域)とその他の区別が特に困難であると考えられる。

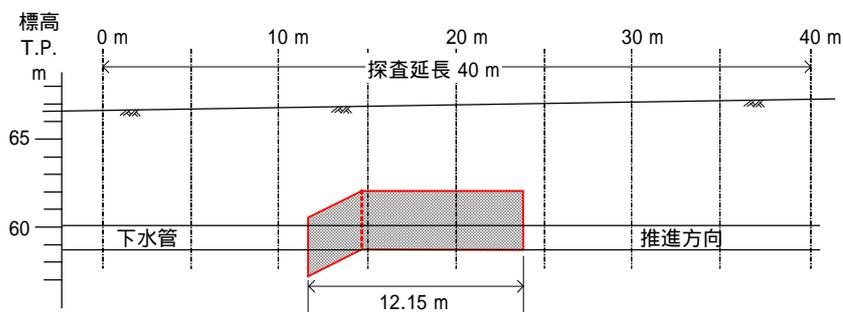
##### 地中レーダ探査(中心周波数350 MHz)

浅層部の埋設管などを良好に検出し、所定の目的を果たした。

なおいずれの手法でも、事前確認されていたヒューム管下方の緩い地盤(図-3(b)ウ.)は検出されず、ヒューム管が探査上の障害物となった可能性がある。



(a) 平面図



(b) 縦断面図：測線

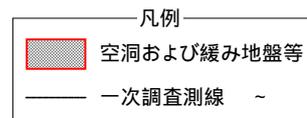
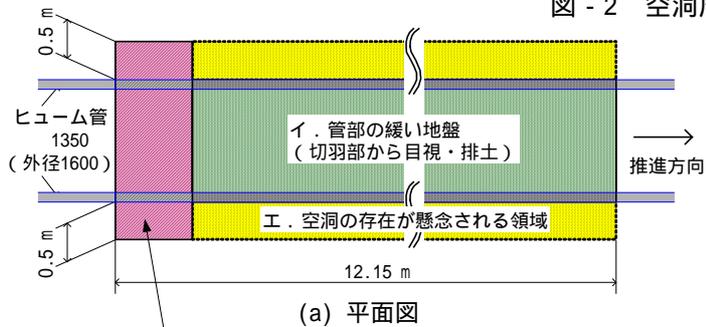
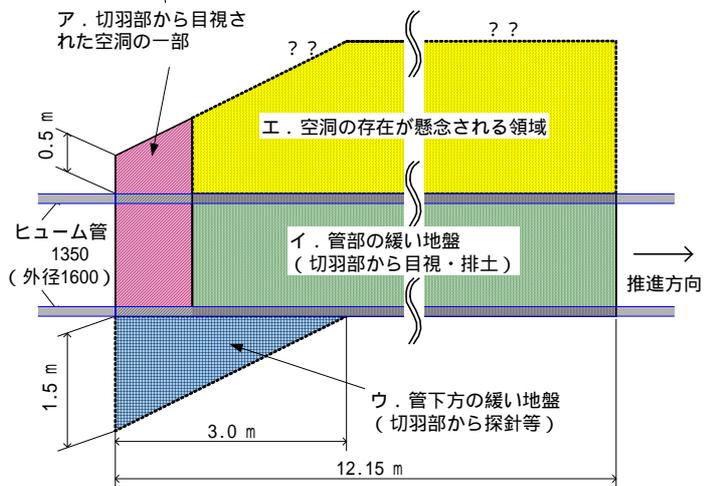


図 - 2 空洞周辺図



(a) 平面図



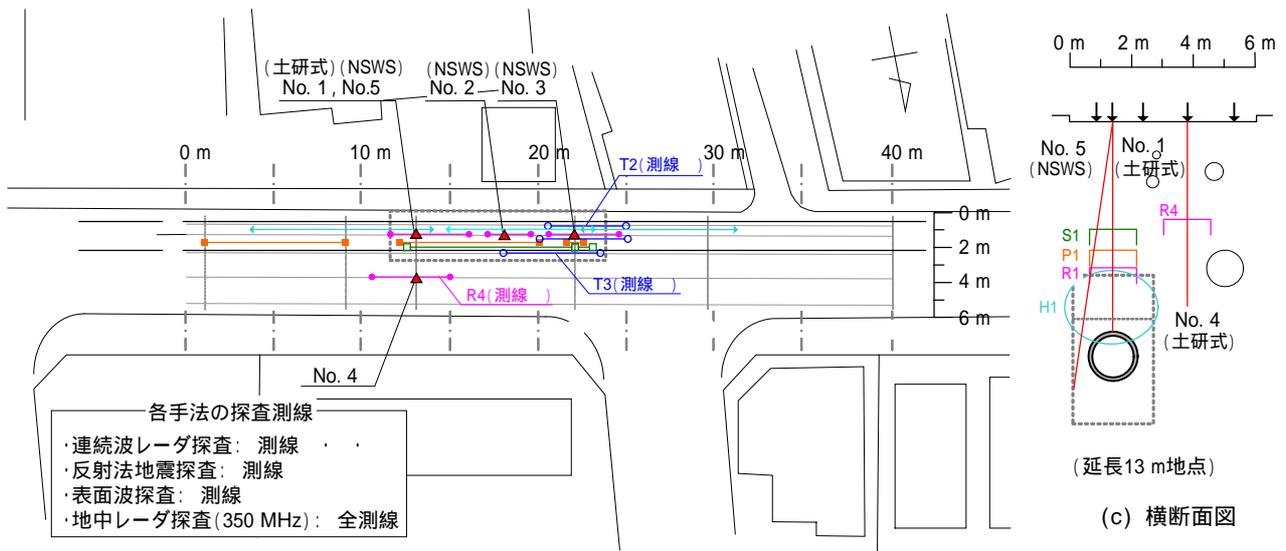
(b) 縦断面図

図 - 3 空洞発見時の状況

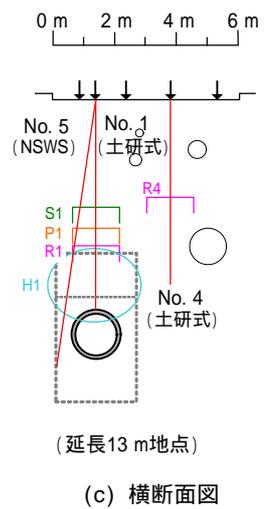


(a) 切羽部の正面 (b) 空洞の上部

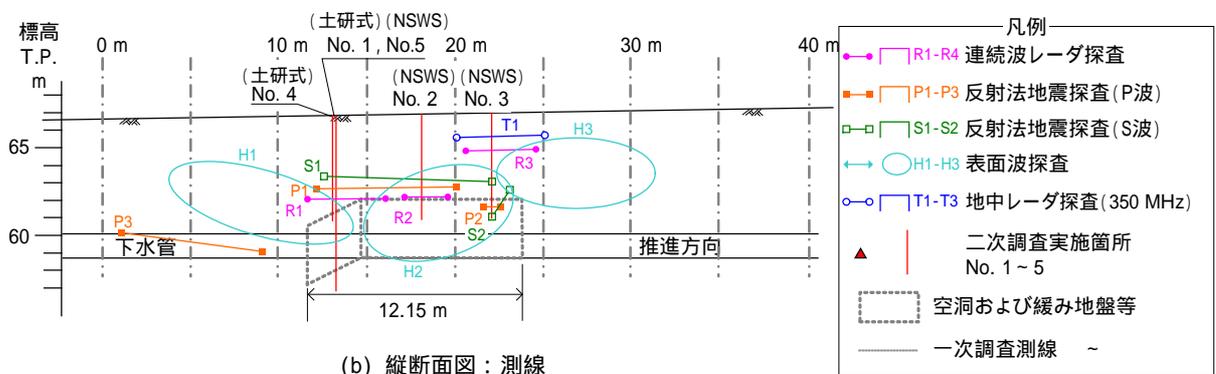
写真 - 1 空洞の目視確認部



(a) 平面図



(c) 横断面図



(b) 縦断面図: 測線

図 - 4 異常反応の位置

表 - 1 異常反応の推定内容

(a) 連続波レーダ探査

測線	異常反応	延長 (m)	深度 (m)	推定内容
	R1	11.5-16.0	4.8	空洞
	R2	17.0-19.5	4.8	空洞
	R3	20.5-24.5	2.2	緩み
	R4	10.5-15.0	3.2	空洞

(b) 反射法地震探査 (P波)

測線	異常反応	延長 (m)	深度 (m)	推定内容
	P1	12.0-20.0	4.2	空洞
	P2	22	5.5	上記空洞の端部
	P3	1.0-9.0	6.5-7.7	下水管

(c) 反射法地震探査 (S波)

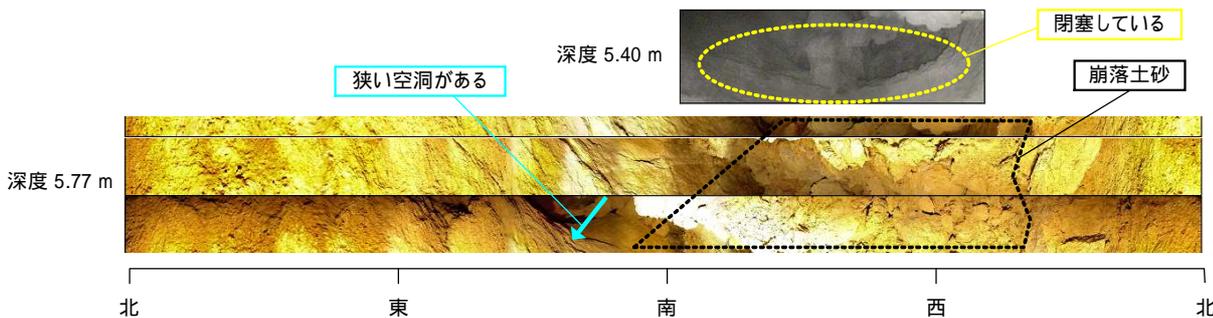
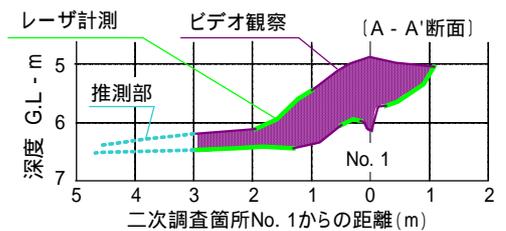
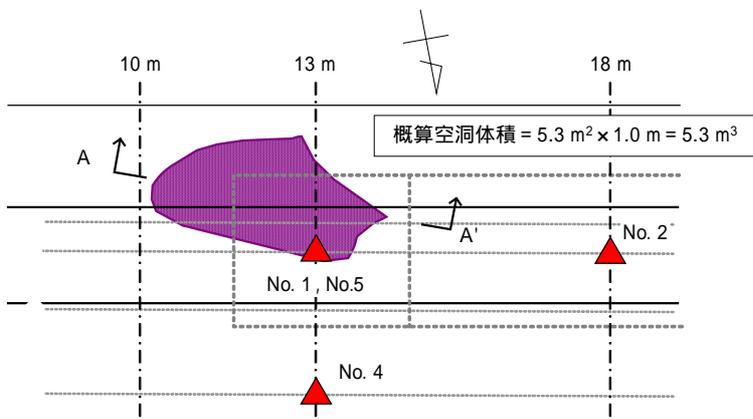
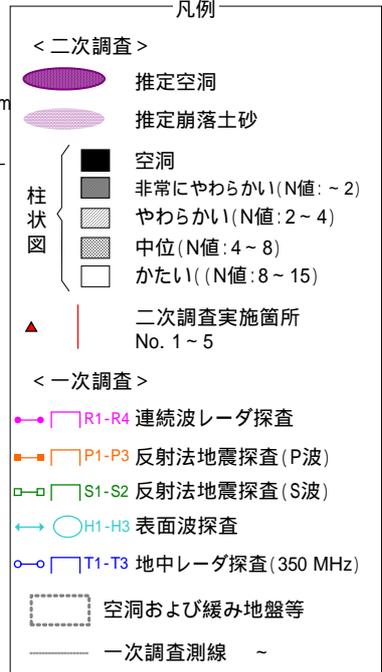
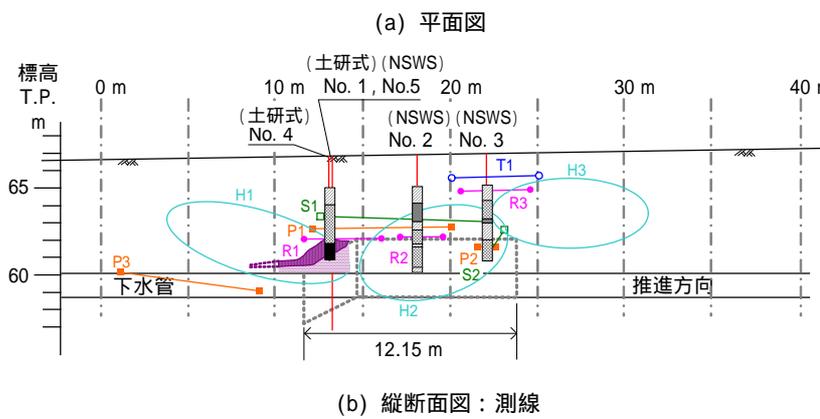
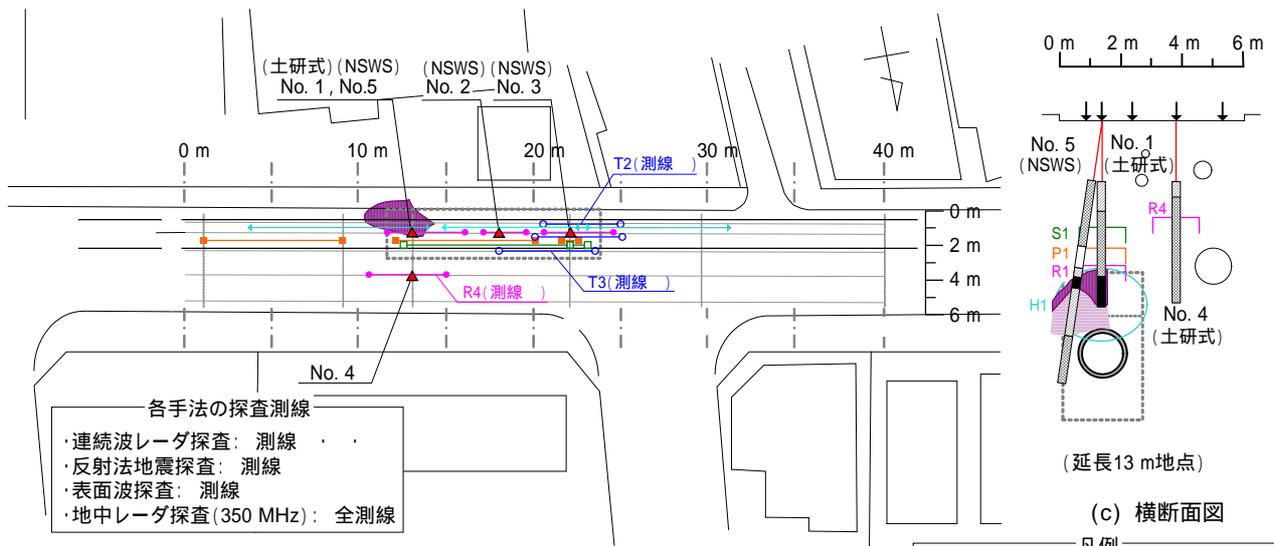
測線	異常反応	延長 (m)	深度 (m)	推定内容
	S1	12.5-22.0	3.5-4.0	空洞
	S2	22.0-23.0	4.5-6.0	上記空洞の端部

(d) 表面波探査

測線	異常反応	延長 (m)	深度 (m)	推定内容
	H1	3.5-14.0	2.5-7.0	下水管
	H2	15.0-23.0	3.0-8.5	空洞
	H3	22.0-31.0	1.5-5.5	地質的要因

(e) 地中レーダ探査 (350 MHz)

測線	異常反応	延長 (m)	深度 (m)	推定内容
	T1	20.0-20.5	1.4-3.0	緩み
	T2	20.5-25.0	1.4-3.0	緩み
	T3	18.0-23.5	1.2-3.0	緩み



(e) ボアホールカメラ画像  
 図 - 5 二次調査の結果

### 3. 事例 2

#### (1) 概要

都道の交差点で開削工法にて電力管敷設工事の施工中、土留め部の土被り約 2.5 m の位置に、水平方向に延びるトンネル状の空洞が発見された。そこで開削工事を中断し、物理探査により空洞の延長や深度の変化、分岐の有無などを調査した。

探査手法は次に示すとおりである。

地中レーダ探査（中心周波数 300 MHz）

地中レーダ探査（中心周波数 350 MHz）

地中レーダ探査（中心周波数 400 MHz）

連続波レーダ探査

上記 ~ の地中レーダ探査は、当該空洞の深度が実験での最大探査深度に近かったことから、中心周波数を変えた複数手法での探査を試みた。連続波レーダ探査は、空洞が深くなった際の追跡目的で用意した。

#### (2) 空洞周辺の状況

空洞の周辺図を図 - 6 に、開口部の状況を写真 - 2 に示す。開口部は幅約 70 cm、高さ約 50 cm の馬蹄形で人工的に築造されたものと考えられた。開口部から目測で 5 m 程度東方に延びたところで北側に左折し、その先は目視不可能であった。なお、地盤は主に関東ロームであり、舗装厚は 70 cm（アスファルト厚 25 cm、砕石厚 45 cm）である。

#### (3) 調査

物理探査を実施した測線は、図 - 7 に示す測線 ~ であり、これらは各探査手法による空洞の検出程度を確認することに主眼を置き設定したものである。

各探査手法により得られた異常反応の位置とその推定内容を図 - 7 および表 - 2 に一覧する。地中レーダ探査（300 MHz・350 MHz）では全測線で明瞭な反応が得られ、2 手法でほぼ同距離・深度に空洞が推定された。地中レーダ探査（400 MHz）では測線 ・ ・ で反応を得たが、不明瞭で空洞とは明言できず、反応位置も 300 MHz・350 MHz の場合と

異なっている。連続波レーダ探査については測線 ・ のみ実施したが、地中レーダ（300 MHz・350 MHz）と同様の結果である。

以上を踏まえ、地中レーダ探査（350 MHz）を用いた追加調査により、空洞を追跡することとした。

#### (4) 追加調査

追加調査の結果を図 - 8 に示す。異常反応範囲は、空洞の目測どおりに開口部からほぼ水平に東へ延びて北側へ左折し、その先の暗渠の手前で止まっていた。この箇所でも空洞が閉塞しているか、あるいは急に深度が深くなっていると判断されたが、空洞が暗渠を伏越してさらに北方に延びていることは考えにくかった。

調査結果を受け、所管建設事務所は異常反応範囲を開削し、実際の空洞状況を確認（図 - 9）した上で埋戻しによる復旧を実施した。図 - 9 で、上記(3)の調査での各探査手法の異常反応の中心位置は、例えば測線 では空洞範囲外にあるなど、空洞範囲の中心線とは一致していない。これは空洞の平面形状と測線方向の関係、空洞壁面の形態などの影響であると考えられる。

#### (5) 探査法の評価

・ 地中レーダ探査（中心周波数 300 MHz・350 MHz・400 MHz）

一般に地中レーダ探査では、送信する電磁波の中心周波数が低いほど探査可能深度が深くなり、検出精度は低くなる傾向がある。

深度 2.2 m 程度、幅 0.7~0.9 m 程度の空洞を調査した今回の調査では、中心周波数が最も高い 400 MHz の場合に空洞の推定が困難な結果となったが、手法を適切に選定すれば実用的な探査法である。

・ 連続波レーダ探査

地中レーダ探査（300 MHz・350 MHz）と同等に空洞を推定できた。しかし、地中レーダ探査と比較した場合、機械

が大型で取り回しにくいなど、今回の深度の調査では作業性や経済性の点で劣る。

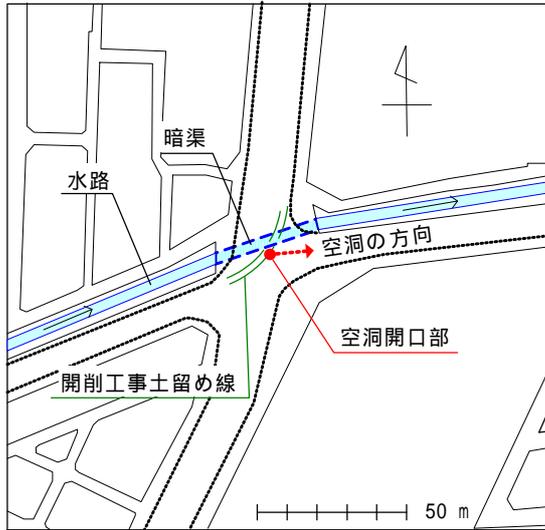


図 - 6 空洞周辺図



写真 - 2 開口部の状況

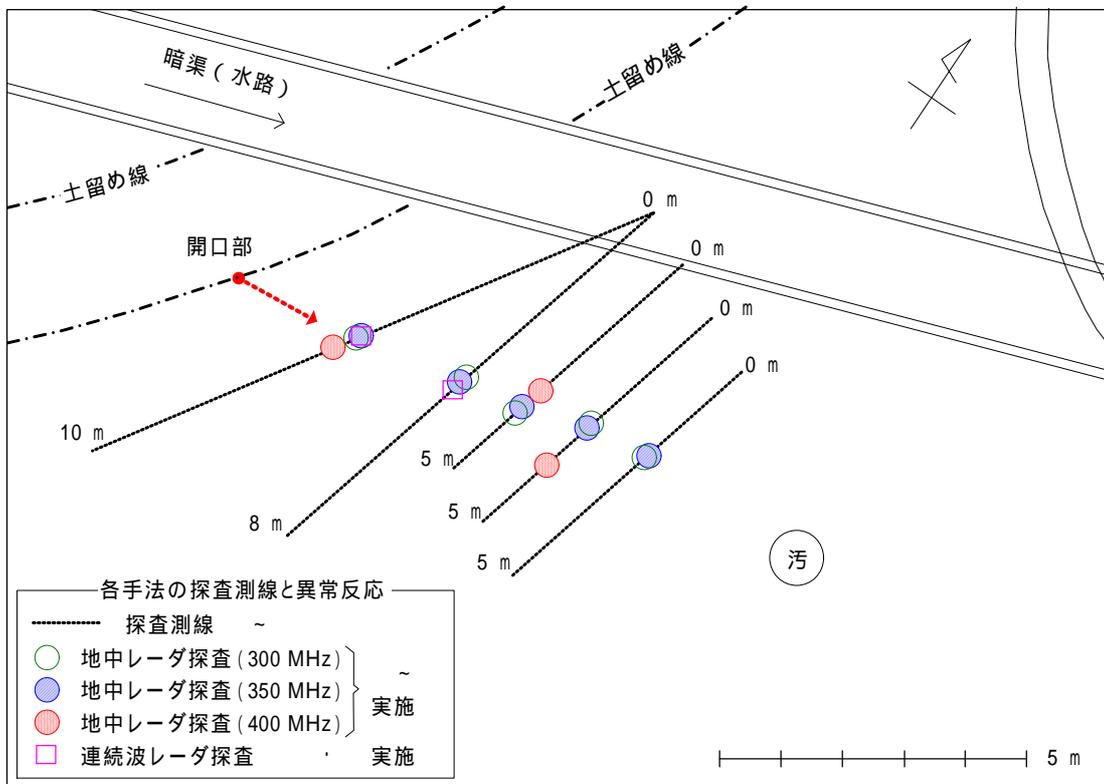


図 - 7 各手法による異常反応の中心位置

表 - 2 異常反応の推定内容

(a) 地中レーダ探査 (中心周波数300 MHz)

測線	水平距離 (m)	深度 (GL - m)	推定内容
	5.3	2.4	空洞
	4.1	2.65	空洞
	3.66	2.52	空洞
	2.6	2.4	空洞
	2.1	2.4	空洞

(b) 地中レーダ探査 (中心周波数350 MHz)

測線	水平距離 (m)	深度 (GL - m)	推定内容
	5.2	2.5	空洞
	4.2	2.7	空洞
	3.5	2.6	空洞
	2.7	2.5	空洞
	2.0	2.5	空洞

(c) 地中レーダ探査 (中心周波数400 MHz)

測線	水平距離 (m)	深度 (GL - m)	推定内容
	5.7	2.3	多重反射あるいは空洞の可能性
			検出なし
	3.1	2.5	空洞の可能性
	3.6	2.6	多重反射あるいは空洞の可能性
			検出なし

(d) 連続波レーダ探査

測線	水平距離 (m)	深度 (GL - m)	推定内容
	5.2	2.5	空洞
	4.4	2.6	空洞

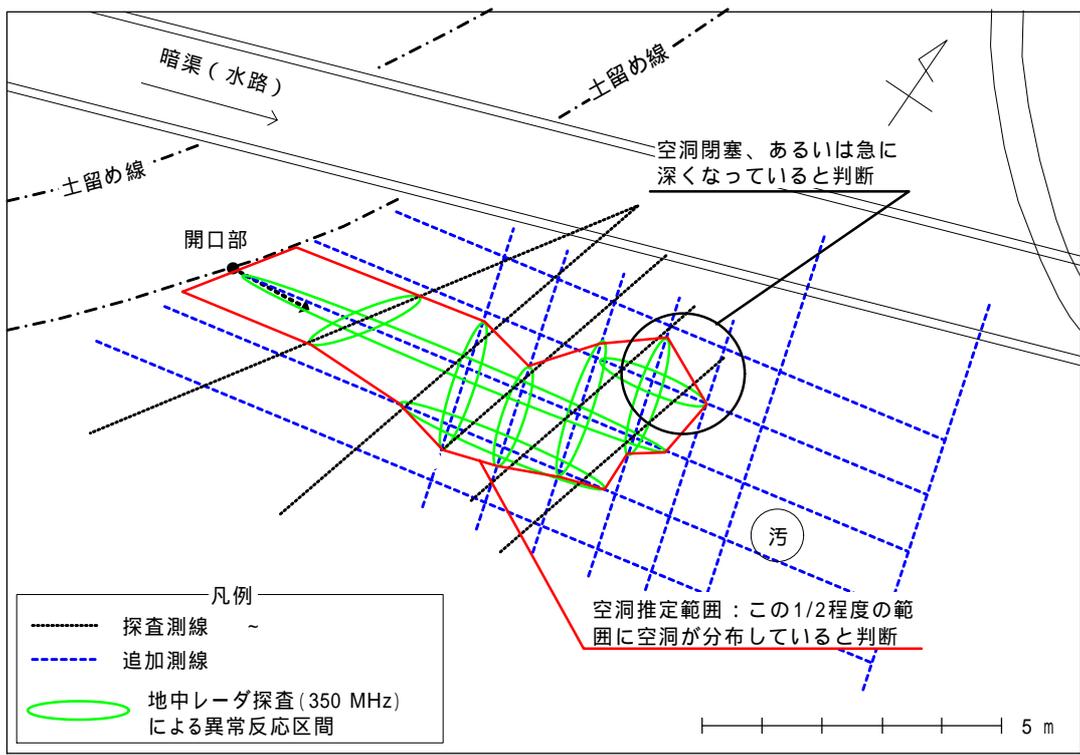


図 - 8 追加調査の結果

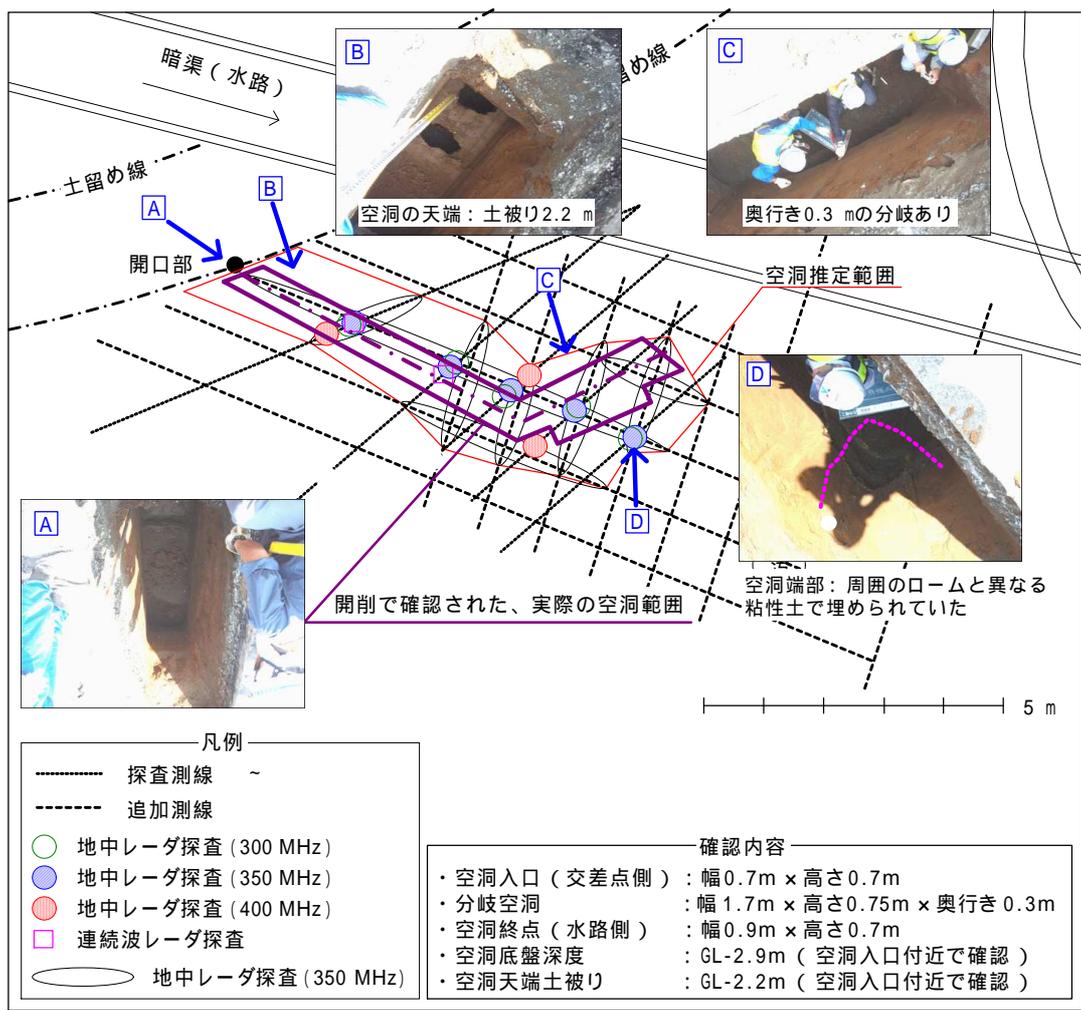


図 - 9 開削による空洞状況の確認

#### 4. まとめと課題

深度約 5 m の空洞を探查した事例 1 では、連続波レーダ探查、反射法地震探查（P 波・S 波）の順に精度良く空洞を推定できた。深度約 2.2 m の空洞を探查した事例 2 では、地中レーダ探查（中心周波数 300 MHz・350 MHz）および連続波レーダ探查で良好に空洞を推定できた。これらの結果は、既報<sup>1)</sup>の屋外模型実験の結果と整合している。また、物理探查では空洞以外の要因も異常反応として検出し、これらの区別は一般に困難であることから、二次調査等による実態確認が必要となることも改めて認識できた。

今回の 2 事例の空洞は、相当以前に人工的に築造されて以来崩壊せずに安定しており、地盤との境界面が明確な空洞であったと考えられる。しかし、地

下水の影響を受けながら徐々に崩壊・進展しているような空洞を探查する場合などで、各探查法の性能が今回と同様とは限らない。

したがって、現道での探查法の性能をより良く把握したり、現場に応じた的確な手法を選定したりするためには、今後の調査事例の積み重ねが必要と考えられる。

#### 5. おわりに

本文は地盤調査会社が実施した調査結果に基づき取りまとめたものである。また所管市、都道所管建設事務所、全体統括の道路管理部保全課、関係工事会社には、調査に当たり何かと便宜を計っていただいた。この場を借りて、関係各位に感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

1) 住吉卓、橋原正周（2009）：路面下空洞（深層部）探查技術に関する屋外模型実験、平 21. 都土木技研年報、159-178