

10. 路面下空洞（深層部）探査技術に関する屋外模型実験（その2）

Field Model Test of Deep Cavity Detection Methods under Road Surface (Part. 2)

技術支援課 住吉卓、橋原正周、大石雅登

1. はじめに

建設局道路管理部からの依頼により、路面下空洞（深層部）探査法の性能評価のために行った実験の結果を報告する。

これは、実験用の「模擬空洞」等を埋設した屋外試験ヤードで各種探査手法を適用する実験であり、既報¹⁾の前回実験に引き続き実施した。前回は、削孔等により路面を損傷しない探査手法を実験した。

今回は主として、舗装を削孔して電極を設置するタイプの電気探査及び電磁探査を実験し、前回同様に深さ方向・水平方向の探査性能を評価した。さらに、前回と今回の結果を合わせて「検出の確実性」も評価した上で、全体を総括した。

2. 実験

今回実験の参加者・探査手法を表-1に一覧する。

(1) 概要

実験の概要は次のとおりである。

- ① 模擬空洞を埋設するなど、現道の路面下で地下躯体の周辺に空洞が生じている状況を想定した屋外試験ヤードにおける実験である。
- ② 参加者（探査会社）は、模擬空洞の位置等の情報を伏せられた状態で物理探査を実施し、模擬空洞の平面位置・深さ・規模を推定する。
- ③ 参加者による推定結果を整理・分析し、探査法の性能を評価する。

表-1 参加者・探査手法一覧

探査手法			参加者 (5社) ^{*1)}					合計	備考
			チ	リ	ル	カ	ヨ		
電気探査	2極法	応答曲線法	○					1	・ 今回実験の主たる評価対象 ・ 舗装を削孔し、棒状の電極を設置する手法
		2次元比抵抗法		○				1	
	4極法	エルトラン配置			○			1	
		2配置併用 ^{*3)}					○	1	
電磁探査	TDEM		○					1	
	CSMT					○		1	
地中レーダ探査 ^{*2)}	低周波型	35 MHz					○	1	参加者の希望により実施
		100 MHz	○					1	
		150 MHz	○					1	
	通常型	200 MHz					○	1	
		300 MHz	○					1	
弾性波探査	反射法地震探査	S波測定		○				1	前回のP波測定と同日に実施した結果を整理したもの
合計			5	2	1	1	3	12	前回13社32手法

*1) チ・リ・ルは前回実験にも参加し、カ・ヨは今回のみ参加した。

*2) 地中レーダ探査の数値 (MHz) は、送信する電磁波の中心周波数を示す。また、「低周波型」・「通常型」は本文での便宜的な呼称である。

*3) ウェンナー配置及びダイポール-ダイポール配置を実施し、両データを合わせて解析した。

(2) 試験ヤード

試験ヤードは図-1に示す盛土構造である。

盛土上面にはアスファルト舗装を施し、舗装面下には、「模擬空洞A~K」の11個、及び「模擬躯体」1体を埋設した。模擬空洞は、空気空洞を想定した大小2種類の発泡スチロールブロックであり、1.5~5.0mの各深度（土被り）に設置した。模擬躯体は、鉄筋コンクリート版15枚を用いて門型に構築し、土被り3.5mの深度に設置した。

埋戻し・盛土に用いた「良質土」は、最大粒径9.5mm、礫分34%、砂分53%、シルト分6%、粘土分7%の細粒分まじり礫質砂であり、盛土の外周部や斜路部の「発生土」は玉石混り砂礫である。地山の土質は、地表から深度1.5mまでは玉石混りシルト質砂、深度1.5~4.5mは玉石混り砂礫、深度4.5~6.0mは粘土混り砂である。

舗装面上には、全参加者が共通して探査する「基本測線①~⑨」を設定した。

その他、試験ヤードの詳細については既報¹⁾を参照されたい。

(3) 実施

参加者は①模擬空洞の位置（平面位置・深度）と形状・寸法や個数、及び②試験ヤードの掘削形状、が伏せられた状態で物理探査を実施した。ただし、模擬空洞が発泡スチロールブロックであり、舗装面から深度1.5~5m程度の範囲に設置したこと、模擬躯体・舗装・埋土材料等の仕様、地山の柱状図、地下水位などは、予め参加者に提供した。

参加者は、定められた①~⑨の基本測線、及び必要に応じ自主追加した測線上を、各々が選定した手法を用いて探査し、模擬空洞の位置（平面位置・深度）、規模（延長・厚さ）を推定することとした。ただし、深度など一部の項目を推定しない手法については、当該項目の推定を除外している。また厚さについては、前回及び今回実験を通じて、精度良く推定した手法が結果的になかったため、以降本文では評価していない。

3. 結果及び評価

今回実験で得られた12手法の探査結果について、前回実験と同様に下記①~③に示す3段階で性能評価を行った。その上で、前回と今回の結果を合わせ、下記④に示す全体総括をした。

① 一次評価

模擬空洞を「検出」した手法の抽出と、評価指標の設定・算出。

② 二次評価

抽出した手法の実験結果の精査と、評価指標に基づいた探査性能の評価。

③ 総合評価（今回実験）

路面下空洞（深層部）探査法としての総合的な性能評価。

④全体総括（前回及び今回実験）

前回及び今回実験の結果を合わせた総括。ここに、既報¹⁾では言及しなかった「検出の確実性」の評価を追加している。

(1) 一次評価

1) 模擬空洞を「検出」した手法の抽出

一次評価では、参加者が推定した空洞の水平範囲と模擬空洞の水平範囲に重複部分がある場合、模擬空洞を「検出」と判定した。

ただし参加者によっては、実験条件で指定された深度1.5m程度よりも浅い浅層部に反応を得た場合も併せて推定空洞として報告しているケースもあった。こうした浅層部についての推定は予め除外し、「検出」の判定を行っている。

2) 評価指標の設定

参加者が推定した模擬空洞、及び模擬躯体の検出状況に対し、下記①~⑧に示すように指標を設定し評価した。このうち、下記⑧の「誤検出率」は、検出の確実性を評価するために本文で追加した指標である。その他は既報¹⁾と同様の指標であるが一部の名称を変更している。

① 検出誤差

模擬空洞の深さ方向の検出性能を示す指標として、次式のように「検出誤差」を定義した。ここに

【平面図】

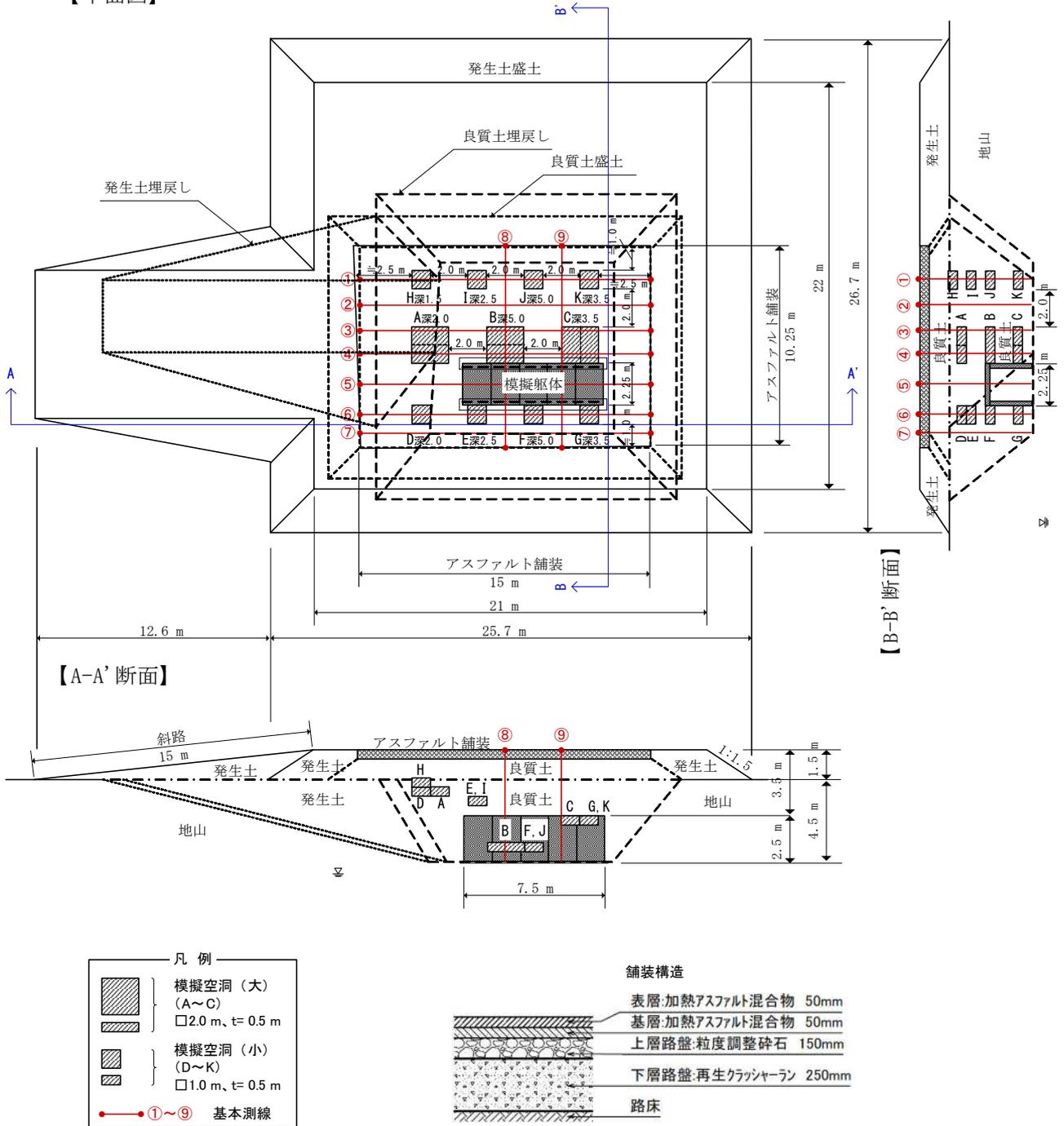


図-1 試験ヤードの概略

深度は、模擬空洞及び推定空洞の上端の深度（土被り）とする。

検出誤差

$$= \frac{\text{推定深度} - \text{模擬空洞の深度}}{\text{模擬空洞の深度}} \times 100 (\%)$$

検出誤差の値が正の場合は推定空洞の深度が模擬空洞よりも深く、負の場合は浅いことを意味している。検出誤差の算出例を図-2に示す。

また、上記 1) の判定により模擬空洞を「検出しなかった」とした場合も含め、検出誤差の絶対値に応じて次の 5 段階の整理も行った。

◎： 10%未満

○： 10%以上 20%未満

□： 20%以上 30%未満

△： 30%以上

－： 検出しなかった

② 全検出率

検出した模擬空洞の多さを比率で示す指標として、「全検出率」を次式のように定義した。

全検出率

$$= \frac{\text{検出した模擬空洞の数}}{\text{模擬空洞の全数 (11個)}} \times 100 (\%)$$

③ 水平検出精度（前回：水平的中率）

模擬空洞ありと推定した水平範囲内に模擬空洞が存在する可能性の高さを示す指標として、「水平検出精度」を次式のように定義した。

水平検出精度

$$= \frac{\text{推定空洞が模擬空洞と水平的に重複する延長}}{\text{推定空洞の延長}} \times 100 (\%)$$

水平検出精度の算出例を図-3に示す。推定延長が等しい場合、模擬空洞との重複延長が長いほど水平検出精度は高くなる（図-3で推定①・②の比較）。重複延長が等しい場合、推定延長が過大でないほど水平検出精度は高くなる（図-3で推定①・③及び推定②・④の比較）。

④ 最大検出深度（前回：本実験での最大探査深度）

各手法で検出した模擬空洞のうち最深の深度を「最大検出深度」と定義した。その値は、各手法が持つ模擬空洞の探査可能深度を示す指標となる。

⑤ 有効検出率

最大検出深度以浅での模擬空洞の検出数の多さ、言い換えれば模擬空洞の見逃しのなさを表す指標として、次式のように「有効検出率」を定義した。

有効検出率

$$= \frac{\text{最大検出深度以浅で検出した模擬空洞の数}}{\text{最大検出深度以浅の模擬空洞の数}} \times 100 (\%)$$

有効検出率の算出例を図-4に示す。

⑥ 模擬躯体の検出状況

各種探査の結果、模擬躯体を検出した場合は“○”、未検出の場合は“×”と整理した。

ここで、模擬躯体を検出「した／しない」の判定は、参加者が報告したデータ解釈等に不合理な点がない限り、参加者による判断とした。

⑦ 模擬躯体の影響

模擬躯体の近傍（測線④・⑥）、及び遠方（測線①・③）の探査結果を比較し、探査結果に与える模擬躯体の有無の影響を確認した。

⑧ 誤検出率

模擬空洞ありと推定した水平範囲内に模擬空洞がない、つまり水平検出精度が0である場合を「誤検出」（ハズレ）であるとし、その多さを示す指標として「誤検出率」を次のように定義した。

誤検出率

$$= \frac{\text{誤検出の数}}{\text{推定空洞の延べ数}} \times 100 (\%)$$

誤検出率及び全検出率の算出例を、「検出」・「検出しなかった」・「誤検出」の概念とともに、図-5に整理して示す。

3) 一次評価の結果

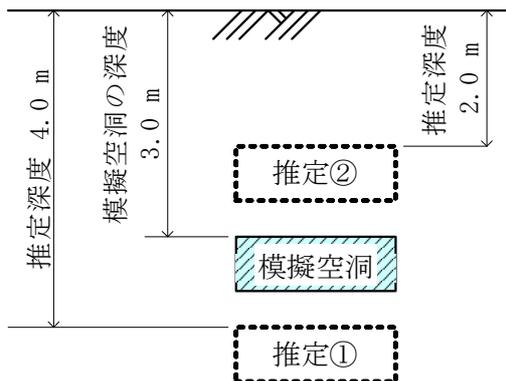
全 11 個の模擬空洞のうち 1 個以上検出した手法は、今回の 12 手法中 10 手法であり、このうち電気探査・電磁探査 6 手法では全手法で模擬空洞を 1 個以上検出した。各手法について算出した評価指標値及び検出評価を、空洞推定位置図や代表断面図等と併せ、一次評価の結果として本文末尾の参考表に示しておく。なお評価結果の一部は、下記(2)の二次評価により修正される。

ここで、次の3手法は空洞の水平位置のみ推定し、深度を推定しない手法であったため、「推定深度」・「検出評価」は「不明」とした。「有効検出率」など他の指標値は参考扱いとして算出したが、他手法との単純比較は成立しない。

- No. 20 電気探査 (2極法、応答曲線法、チ)
- No. 24 電磁探査 (TDEM、チ)
- No. 25 電磁探査 (CSMT、カ)

また、次の3手法では水平方向の空洞延長を推定せず、点でのみ推定していたため、水平検出精度を算出していない。

- No. 20 電気探査 (2極法、応答曲線法、チ)
- No. 24 電磁探査 (TDEM、チ)
- No. 27 地中レーダ探査 (150 MHz、チ)



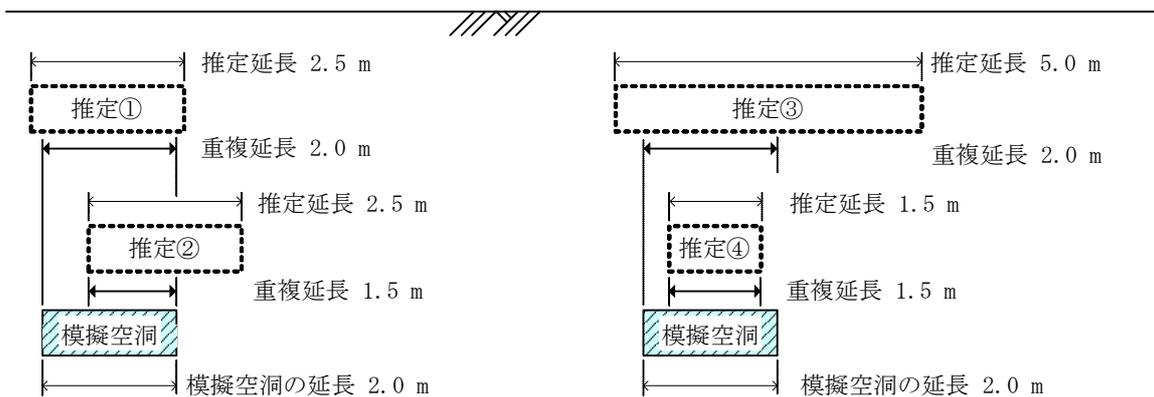
推定①：模擬空洞よりも深く推定 → 検出誤差が正

$$\text{検出誤差} = (3.0 - 4.0) / 3.0 \times 100 = -33\%$$

推定②：模擬空洞よりも浅く推定 → 検出誤差が負

$$\text{検出誤差} = (3.0 - 2.0) / 3.0 \times 100 = +33\%$$

図-2 「検出誤差」の算出例



推定①：模擬空洞の全延長が推定範囲内
水平検出精度 = $2.0 / 2.5 \times 100 = 80\%$

推定②：模擬空洞の一部延長が推定範囲内
水平検出精度 = $1.5 / 2.5 \times 100 = 60\%$

推定③：推定①に比べて推定延長が長く、模擬空洞を過大評価している
→ 水平検出精度は①より小さい

$$\text{水平検出精度} = 2.0 / 5.0 \times 100 = 40\%$$

推定④：推定延長が短く、模擬空洞を過小評価しているが、推定②に比べて重複延長の比率が高い
→ 水平検出精度は②より大きい

$$\text{水平検出精度} = 1.5 / 1.5 \times 100 = 100\%$$

図-3 「水平検出精度」の算出例

(2) 二次評価

1) 一次評価結果の精査

電気探査のうち、No. 21（二次元比抵抗法、リ）では模擬空洞 B・J、No. 22（エルトラン配置、ル）では模擬空洞 J の検出誤差が他の模擬空洞に比べて大きかったため、「検出しなかった」と判定を見直した。その他の精査結果も含め、二次評価後の各指標値の一覧を表-2 に示す。最終的に、全 11 個の模擬空洞のうち 1 個以上検出した手法は、今回の 12 手法中 8 手法に絞り込まれた。

2) 二次評価の結果

表-2 の評価指標値を用い、深さ方向及び水平方向の探査性能を図-6 に示す。ここに、No. 20・24・25 の 3 手法については、上記(1)3)で説明した参考扱いの評価値を () 書きでプロットしている。図-6(a)は、最大検出深度と有効検出率の関係である。プロットが右下にあるほど、模擬空洞をより深くまで見逃しなく検出したことになり、深さ方向の探査性能が高いことを示す。図-6(b)は最大検出深度と水平検出精度（平均）の関係である。プロットが右

模擬空洞	深度	検出判定	検出評価
H	1.5 m	「検出」	◎
A	2.0 m	「検出」	○
D	2.0 m	「検出」	
I	2.5 m	「検出しなかった」	—
E	2.5 m	「検出」	
C	3.5 m	「検出」	△
K	3.5 m	「検出しなかった」	—
G	3.5 m	「検出しなかった」	—
B	5.0 m	「検出しなかった」	—
J	5.0 m	「検出しなかった」	—
F	5.0 m	「検出しなかった」	—

計11個

有効検出率 = $5/8 \times 100 = 63\%$
 (全検出率 = $5/11 \times 100 = 45\%$)

最大検出深度以浅の
模擬空洞の数：8個

最大検出深度 3.5 m

最大検出深度以浅で
「検出」した
模擬空洞の数：5個
(* 検出誤差は考慮し
ない)

図-4 「有効検出率」の算出例

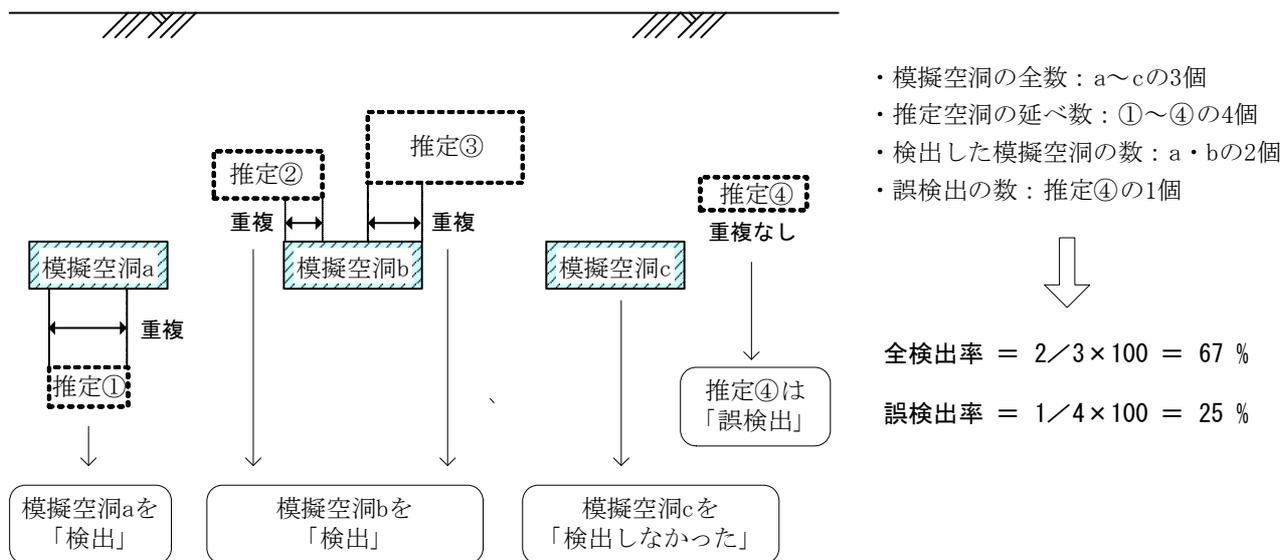


図-5 「誤検出率」及び「全検出率」の算出例

下にあるほど、模擬空洞をより深くまで精度よく検出したことになり、水平方向の探査性能が高いことを示す。以下図-6で、電気探査・電磁探査の結果に着目する。

電気探査 (No. 20・21・22・23) のうち、No. 23 はより深い深度 (3.5 m) まで検出し、有効検出率は 50 % と小さくなるが、水平検出精度は 71 % を確保している。No. 21 は鉛直方向・水平方向ともに探査性能が低い結果であった。No. 22 は、深度 2.0 m 以浅に限定すれば、鉛直方向・水平方向ともに探査性能が高いといえる。No. 20 は深度を推定しない手法ではあるが、深度 5.0 m までの模擬空洞を検出した。ただし有効検出率は 27 % と小さい。

電磁探査 (No. 24・25) はいずれも深度を推定しない手法ではあるが、No. 25 はすべての模擬空洞を検出した。No. 24 は深度 1.5 m の模擬空洞 H のみ検出した。

(3) 総合評価 (今回実験)

今回実験を実施した 12 手法の一次評価及び二次評価の結果に基づき、各探査法について次のように総合評価した。

① 電気探査 (4 手法実施)

電気探査は 2 極法・4 極法ともに、これまで防空壕や坑道跡などの比較的規模が大きい空洞探査に用いられることが多く、路面下空洞探査への適用例は少ない。一般的には 2 極法の方が探査可能深度が大きく分解能は低いとされている。今回実験で深度 5.0 m の空洞を検出したのは、深度を推定しない手法 (No. 25) ではあるが 2 極法であり、浅い深度での探査性能が高かったのは 4 極法であったので、上記の一般的特徴が表れた可能性がある。

深さ方向・水平方向の探査性能からは、4 極法の方が路面下空洞探査に適していると思われるが、後出の図-7 に示すとおり、前回実験の連続波レーダ探査などには及ばず、深度 2 m 程度以浅に限定した場合でも地中レーダ探査 (通常型) 以上ではない。

② 電磁探査 (2 手法実施)

路面下空洞探査法としては研究段階にあると考えられる。No. 25 は、深度を推定しない手法ではあ

るが、すべての模擬空洞を検出した。深度を推定する解析方法の確立、水平方向の探査性能や検出の確実性の向上が望まれる。

③ 地中レーダ探査 (5 手法実施)

今回は中心周波数 35・100・150・200・300 MHz を各 1 手法実施した。評価は前回実験と同様のことがいえるので既報¹⁾を参照されたい。

④ 反射法地震波探査 (1 手法実施)

No. 29 (S 波測定) では模擬空洞を検出できず、前回報告した No. 19 (P 波測定) の探査性能に及ばなかった。

(4) 全体総括 (前回及び今回実験)

前回・今回の実験結果を合わせ、全体を総括する。

1) 深さ方向・水平方向の探査性能

深さ方向及び水平方向の探査性能を図-7 に示す。これは、既報¹⁾に示した前回実験の結果に図-6 を加えて更新したものとなっている。

図-7 を見ると、上記(3)の 2)・3)の二次評価・総合評価に述べたことが改めて確認できるほか、図-7(b)では、全体的に一点鎖線で示すようにプロットが右上～中央下に分布する傾向が認められる。これには「探査深度が大きいほど分解能が低下する」という、物理探査の一般的な特徴が表れていると考えられる。

2) 検出の確実性

誤検出率と有効検出率の関係を図-8 に示す。上述した深さ方向・水平方向の探査性能 (図-6・図-7) が、「検出」した模擬空洞を対象とした評価であったのに対し、図-8 は「誤検出」の少なさを考慮した評価となっている。つまり、プロットが右下にあるほど、最大検出深度以浅の模擬空洞をより見逃しなく、かつハズレなく検出したことになり、検出の確実性が高いことを示す。さらに、各プロットに付記した最大検出深度も大きい場合は、より深くまで検出の確実性が高いことになる。

図-8 のプロットには、白矢印 (⇒) に沿って左上～右下の領域に分布する傾向が認められる。これは「空洞を見逃さない手法はハズレも少ない」と解釈できる。以下図-8 を参照し、探査法別に述べる。

連続波レーダ探査は、検出の確実性が高い右下に位置し、かつ最大検出深度も 5.0 m と大きい。

地中レーダ探査（通常型）の多くは有効検出率 100%であるが、ハズレの少なさについては手法間の差が大きく、黒矢印（➡）に沿って誤検出率 73～100%の間に分布している。

地中レーダ探査（低周波型）及び電気探査は、上記の白矢印（↘）に沿う傾向に当てはまっている。

電気探査で最も右下の No. 22 は、地中レーダ探査（通常型）の中では「見逃しは多いがハズレのない」No. 15 と同位置にあり、最大検出深度も 2.0 m で等しい。

反射法地震探査（P波測定）は、最大検出深度は 5.0 m であるが、中央付近に位置し、検出の確実性は高くない。

表-2 二次評価による指標値一覧（今回実験）

探査手法			参加者	最大検出深度	全検出率	有効検出率	水平検出精度（平均）	誤検出率	No.	
電気探査	2極法	応答曲線法 ^{*1)*2)}	チ	(5.0 m)	(27 %)	(27 %)	—	(84 %)	20	
		2次元比抵抗法	リ	2.0 m	9 %	33 %	100 %	71 %	21	
	4極法	エルトラン配置	ル	2.0 m	27 %	100 %	80 %	33 %	22	
		2配置併用	ヨ	3.5 m	36 %	50 %	71 %	37 %	23	
電磁探査	TDEM ^{*1)*2)}		チ	(1.5 m)	(9 %)	(100 %)	—	(75 %)	24	
	CSMT ^{*1)}		カ	(5.0 m)	(100 %)	(100 %)	(51 %)	(33 %)	25	
地中レーダ探査	低周波型	35MHz	ヨ	模擬空洞を検出しなかった（二次評価による見直し）						26
		100MHz	チ	模擬空洞を検出しなかった						—
		150MHz ^{*2)}	チ	2.5 m	9 %	28 %	—	87 %	27	
	通常型	200MHz	ヨ	1.5 m	9 %	100 %	100 %	50 %	28	
		300MHz	チ	模擬空洞を検出しなかった						—
弾性波探査	反射法地震探査	S波測定	リ	模擬空洞を検出しなかった（二次評価による見直し）						29

*1) 深度を推定しない手法であるため参考扱いとし、評価値を()付きで示した。

*2) 空洞延長の推定がなされなかったため、水平検出精度を算出していない。

*3) 「No.」は、前回実験からの通し番号であり、一次評価で「模擬空洞を1個以上検出した」と判断した手法に付している。

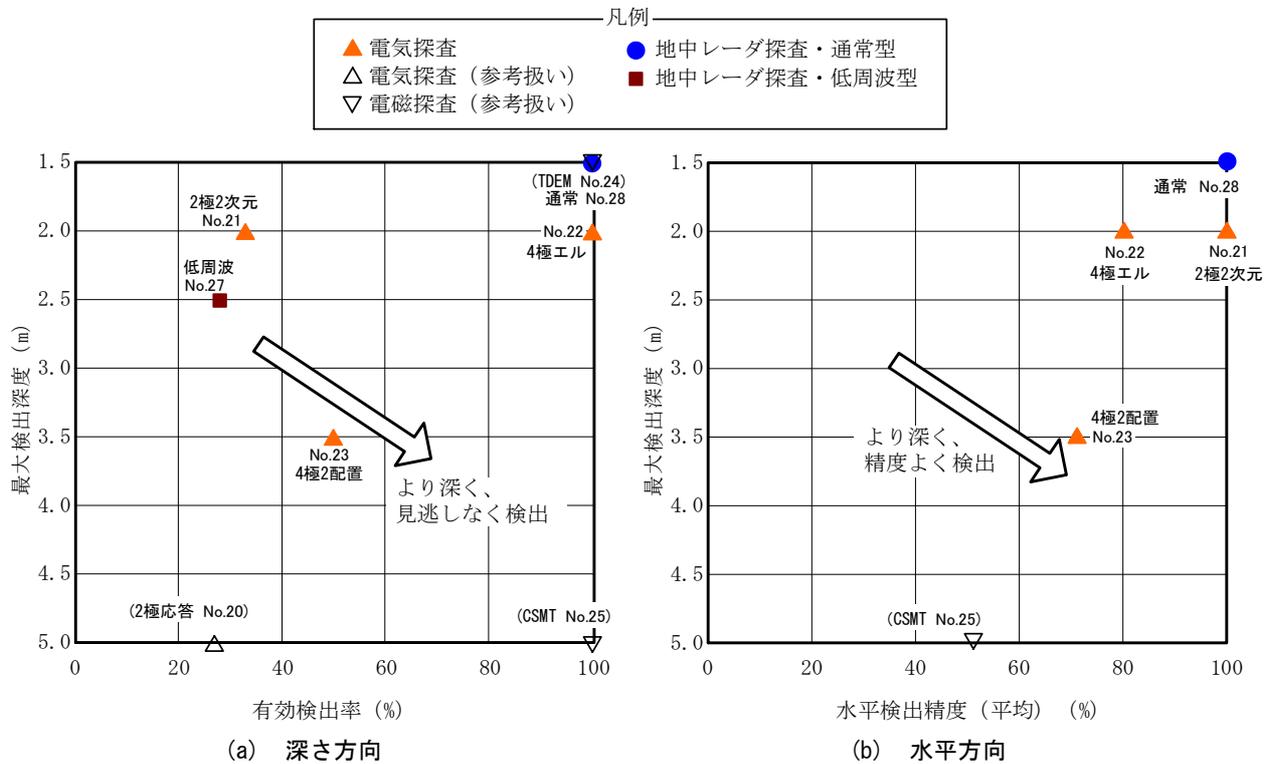


図-6 深さ方向及び水平方向の探査性能（今回実験）

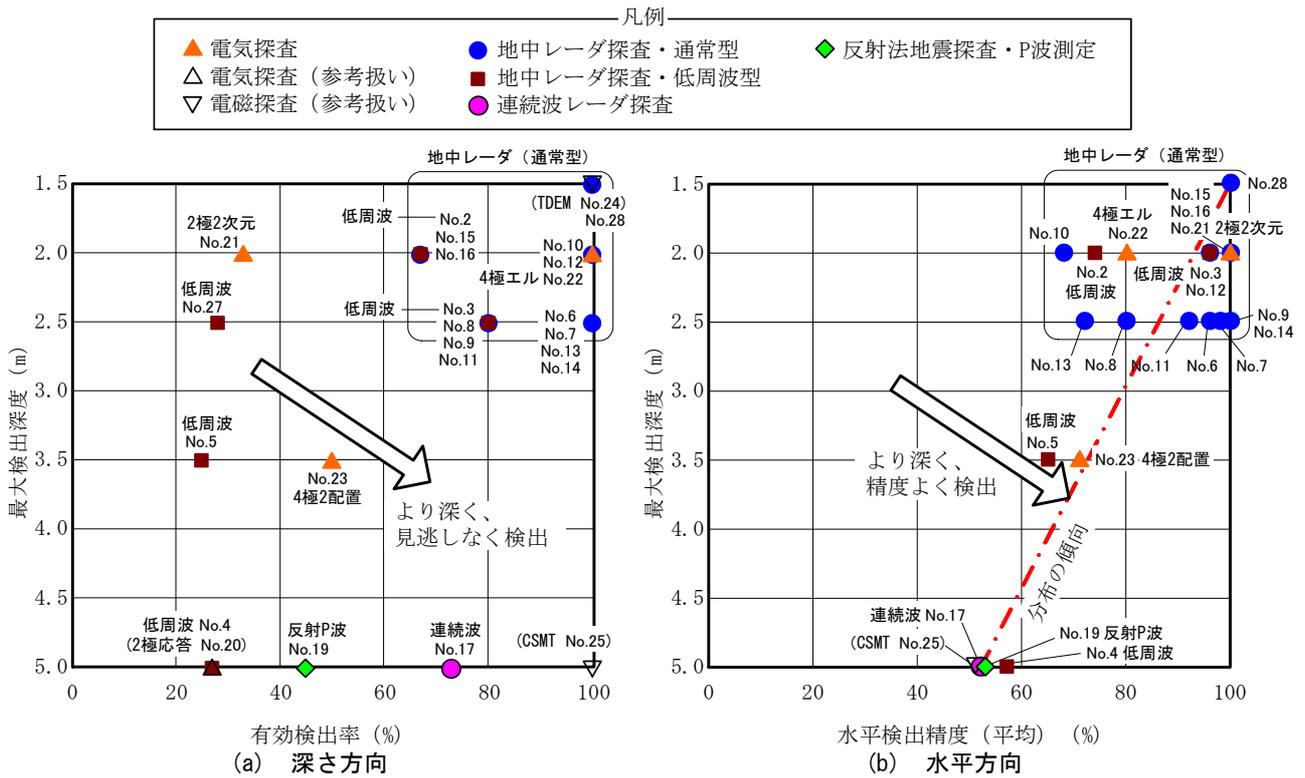


図-7 深さ方向及び水平方向の探査性能（前回及び今回実験）

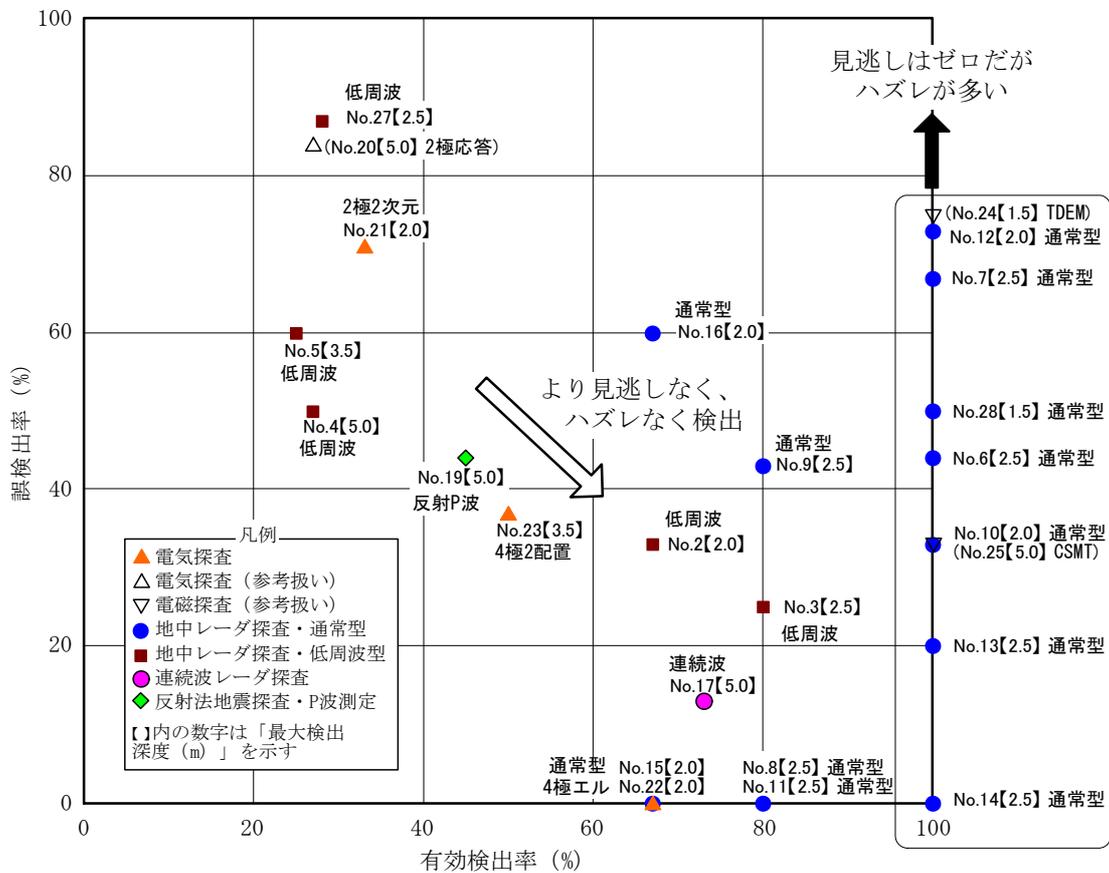


図-8 検出の確実性（前回及び今回実験）

3) まとめ

舗装面下の深度 1.5～5.0 m に埋設した、□1.0 m 及び□2.0 m (いずれも厚さ 0.5 m) の模擬空洞を探索した実験結果に基づき、表-3 及び次のように結論する。

- ①連続波レーダ探索は、深さ方向の探索性能と検出の確実性がともに高く、深度 1.5～5.0 m の模擬空洞を最も満遍なく検出した。ただし、規模の小さい□1.0 m の模擬空洞の検出可能深度は 3.5 m 前後であった。また、深度 1.5～2.5 m では、水平方向の探索性能は地中レーダ探索の性能に及ばない。以上を踏まえると、連続波レーダ探索は、地中レーダ探索の探索可能深度よりも深い位置の探索に用いるのが有効と考えられる。
- ②地中レーダ探索 (通常型、200～400 MHz) は、深度 1.5～2.5 m に限定した場合、連続波レーダ探索と比較して、深さ方向の探索性能はいくつかの手法では同等であり、水平方向の探索性能は上述のように連続波レーダより優れている。しかし、模擬空洞を 1 個も検出できなかった手法があり、ま

た、検出の確実性のバラツキも大きかった。これは、機器や解析ソフトの仕様、調査者の熟練度等によるものと考えられる。以上より、探索深度を限定すれば、適切な手法により良好な探索が可能と考えられる。

③評価対象とした他の探索法は、上記①・②の探索性能以上ではない。もしくは深度を推定しない「参考扱い」の手法につき、今回他手法との比較をしていない。

4. おわりに

前回実験に続き、路面下深層部に模擬空洞及び模擬躯体を埋設した屋外試験ヤードで、参加者 (探査会社) による模擬空洞の探索実験を実施し、探索法の性能を評価した。一連の実験の結果、各種探索法の基本的な探索性能の現状が把握できた。

本文が、今後の路面下空洞調査や探索技術開発の参考になれば幸いである。

最後に、労を惜しまず実験に自費参加し、結果報告をしていただいた参加者各位に感謝いたします。

表-3 連続波レーダ探索と地中レーダ探索 (中心周波数 200～400 MHz) の実験結果

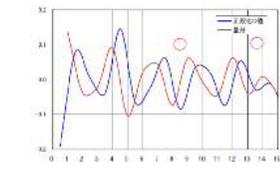
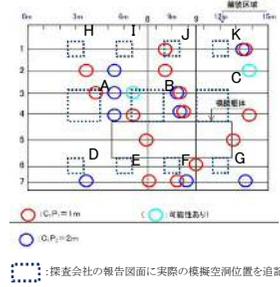
探査法	連続波レーダ探索	地中レーダ探索 (中心周波数200～400 MHz)
探査対象	舗装面下の深度1.5～5.0 mに埋設した、□1.0 m及び□2.0 m (いずれも厚さ0.5 m) の模擬空洞、全11個	
実験手法数	1	16
探査結果	深度 1.5～2.5 m	<ul style="list-style-type: none"> すべての模擬空洞を検出した (□1.0 mが4個、□2.0 mが1個)。 水平方向の探索性能は地中レーダ探索よりも低かった (当該深度範囲での水平検出精度=50%)。
	深度 3.5 m	いずれの手法も、模擬空洞を1個も検出しなかった。
	深度 5.0 m	
まとめ	地中レーダ探索よりも深い位置の探索に用いるのが有効	適切な手法により、深度2.5 m程度までは良好な探索が可能

参考文献

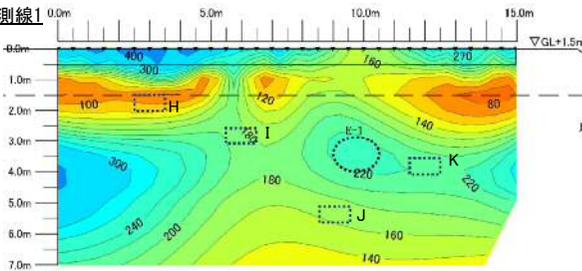
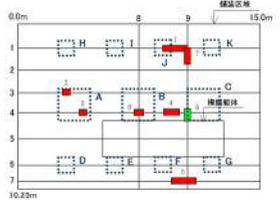
- 1) 住吉卓、橋原正周 (2009) : 路面下空洞 (深層部) 探索技術に関する屋外模型実験、平 21. 都土木技術支援・人材育成センター年報、159-178

参考表 模擬空洞を検出した10手法の一次評価結果 (1/4)

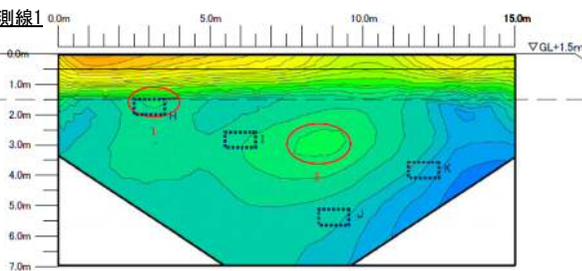
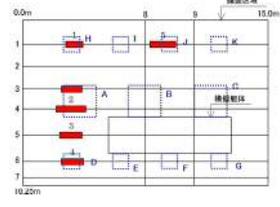
No. 20 電気探査 (2極法、応答曲線法、チ) …深度を推定しない手法につき、参考扱いとする

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表図	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 3/11=27%	-	平均 ◇	測線1 	
		A	2m	2.0m	不明	不明		0/0=			
		D	1m	2.0m	-	-		-			
		I	1m	2.5m	-	-		-			
		E	1m	2.5m	-	-		-			
		C*	2m	3.5m	-	-		-			
		K	1m	3.5m	-	-		-			
		G*	1m	3.5m	-	-		-			
		B*	2m	5.0m	不明	不明		0/0=			
		J	1m	5.0m	不明	不明		0/0=			
		F*	1m	5.0m	-	-		-			
		測定機器	模擬躯体	延長2.25m	3.5m	-		-			
延長7.5m	3.5m		-	-	-	×	-				

No. 21 電気探査 (2極法、2次元比抵抗法、リ)

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 3/11=27%	-	平均 83%	測線1 	
		A	2m	2.0m	1.3m	△		0.5/0.5= 100%			
		D	1m	2.0m	-	-		-			
		I	1m	2.5m	-	-		-			
		E	1m	2.5m	-	-		-			
		C*	2m	3.5m	-	-		-			
		K	1m	3.5m	-	-		-			
		G*	1m	3.5m	-	-		-			
		B*	2m	5.0m	2m	△		1.0/1.0= 100%			
		J	1m	5.0m	3m	△		0.5/1.5= 33%			
		F*	1m	5.0m	-	-		-			
		測定機器	模擬躯体	延長2.25m	3.5m	-		-			
延長7.5m	3.5m		-	-	-	○	-				

No. 22 電気探査 (4極法、エルトラン配置、ル)

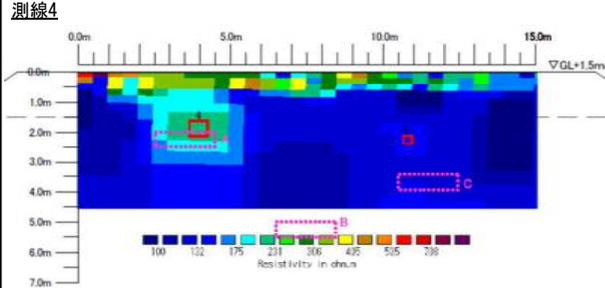
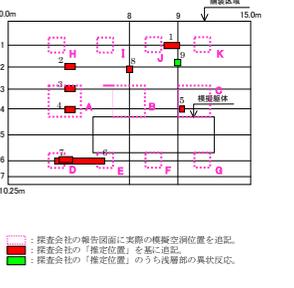
探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	1.5m	◎	全検出率 4/11=36%	0.8/1= 80%	平均 76%	測線1 	
		A	2m	2.0m	1.5m	□		1.2/1.3= 92%			
		D	1m	2.0m	1.5m	□		1/1.4= 71%			
		I	1m	2.5m	-	-		-			
		E	1m	2.5m	-	-		-			
		C*	2m	3.5m	-	-		-			
		K	1m	3.5m	-	-		-			
		G*	1m	3.5m	-	-		-			
		B*	2m	5.0m	-	-		-			
		J	1m	5.0m	2.5m	△		0.9/1.6= 56%			
		F*	1m	5.0m	-	-		-			
		測定機器	模擬躯体	延長2.25m	3.5m	-		-			
延長7.5m	3.5m		-	-	-	○	-				

注1)*: 模擬空洞B・C・F・Gは、模擬躯体に接して設置している。
注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞および模擬躯体を検出した測線の断面を示している。

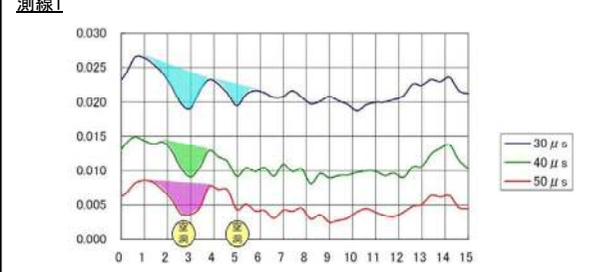
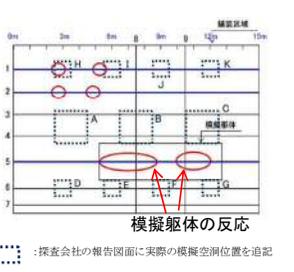
注3)「不明」: 深度が推定されていない場合を表す。
注4)◇: 水平延長が示されていない場合を表す。

参考表 模擬空洞を検出した10手法の一次評価結果 (2/4)

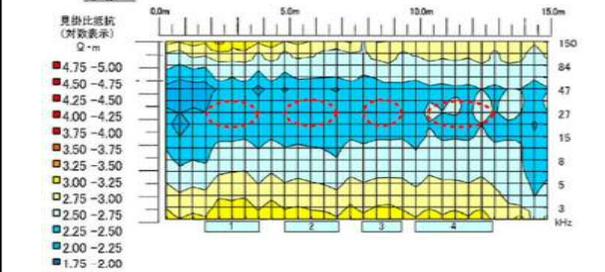
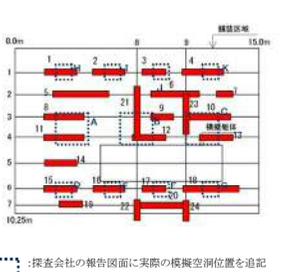
No. 23 電気探査 (4極法、2配置併用、ヨ)

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 4/11=36%	-	平均 71%	測線4 	
		A	2m	2.0m	1.7m	○		0.6/0.6= 100%			
D		1m	2.0m	3.8m	△	0.3/0.8= 38%					
I		1m	2.5m	-	-	-					
E		1m	2.5m	4.0m	△	0.5/3.1= 16%					
C*		2m	3.5m	2.1m	△	0.3/0.3= 100%					
K		1m	3.5m	-	-	-					
G*		1m	3.5m	-	-	-	有効検出率 4/8=50%	-			
B*		2m	5.0m	-	-	-	-				
J		1m	5.0m	-	-	-	-				
F*	1m	5.0m	-	-	-	-	-				
測定機器 	模擬 躯体	延長2.25m	3.5m				×				
	延長7.5m	3.5m					×				
最大検出深度						3.5m					

No. 24 電磁探査 (TDEM、チ) …深度を推定しない手法につき、参考扱いとする

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表図	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	不明	不明	全検出率 1/11=9%	0/0= ◇	平均 ◇	測線1 	
		A	2m	2.0m	-	-		-			
D		1m	2.0m	-	-	-					
I		1m	2.5m	-	-	-					
E		1m	2.5m	-	-	-	-				
C*		2m	3.5m	-	-	-	-				
K		1m	3.5m	-	-	-	-				
G*		1m	3.5m	-	-	-	有効検出率 1/1=100%	-			
B*		2m	5.0m	-	-	-	-				
J		1m	5.0m	-	-	-	-				
F*	1m	5.0m	-	-	-	-	-				
測定機器 	模擬 躯体	延長2.25m	3.5m				×				
	延長7.5m	3.5m					○				
最大検出深度						1.5m					

No. 25 電磁探査 (CSMT、カ) …深度を推定しない手法につき、参考扱いとする

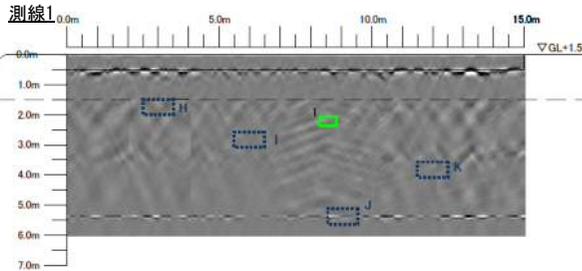
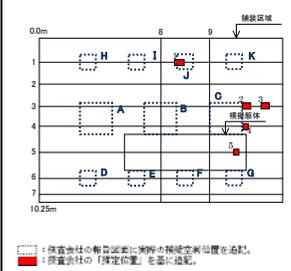
探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表図	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	不明	不明	全検出率 11/11=100%	1/2= 50%	平均 51%	測線1 	
		A	2m	2.0m	不明	不明		1.75/2.5= 70%			
D		1m	2.0m	不明	不明	1/2= 50%					
I		1m	2.5m	不明	不明	1/2= 50%					
E		1m	2.5m	不明	不明	1/2= 50%					
C*		2m	3.5m	不明	不明	2/2.75= 73%					
K		1m	3.5m	不明	不明	1/2.5= 40%					
G*		1m	3.5m	不明	不明	1/3.5= 29%	有効検出率 11/11=100%	1.25/2= 63%			
B*		2m	5.0m	不明	不明	0.75/1.5= 50%	-				
J		1m	5.0m	不明	不明	0.75/1.5= 50%	-				
F*	1m	5.0m	不明	不明	-	-	-				
測定機器 	模擬 躯体	延長2.25m	3.5m				○				
	延長7.5m	3.5m					×				
最大検出深度						5.0m					

注1)*: 模擬空洞B・C・F・Gは、模擬躯体に接して設置している。
注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞および模擬躯体を検出した測線の断面を示している。

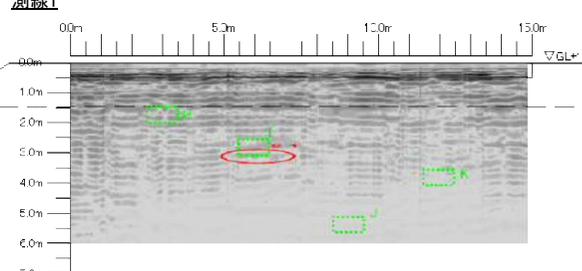
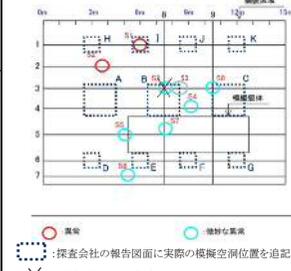
注3) 「不明」: 深度が推定されていない場合を表す。
注4) ◇: 水平延長が示されていない場合を表す。

参考表 模擬空洞を検出した10手法の一次評価結果 (3/4)

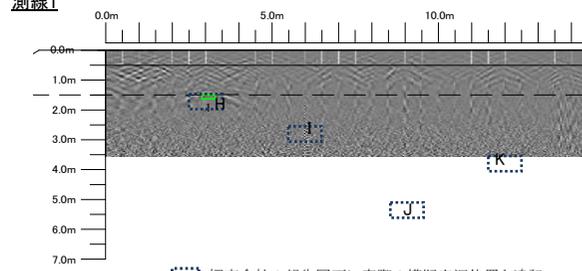
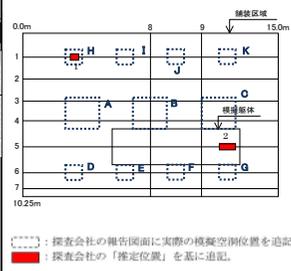
No. 26 地中レーダ探査 (低周波型、35 MHz、ヨ)

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 1/11=9%	-	平均 67%	測線1 	
		A	2m	2.0m	-	-		-			
D		1m	2.0m	-	-	-					
I		1m	2.5m	-	-	-					
E		1m	2.5m	-	-	-	-				
C*		2m	3.5m	-	-	-	-				
K		1m	3.5m	-	-	-	-				
G*		1m	3.5m	-	-	-	有効検出率 1/11=9%	-			
B*		2m	5.0m	-	-	-		-			
J		1m	5.0m	2m	△	0.4/0.6 = 67%		-			
F*		1m	5.0m	-	-	-		-			
測定機器 	模擬	延長2.25m	3.5m			×					
	躯体	延長7.5m	3.5m			×					
	最大検出深度					5.0m					

No. 27 地中レーダ探査 (低周波型、150 MHz、チ)

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 1/11=9%	-	平均 ◇	測線1 	
		A	2m	2.0m	-	-		-			
D		1m	2.0m	-	-	-					
I		1m	2.5m	3m	□	0/0 = ◇		-			
E		1m	2.5m	-	-	-	-				
C*		2m	3.5m	-	-	-	-				
K		1m	3.5m	-	-	-	-				
G*		1m	3.5m	-	-	-	有効検出率 1/5=20%	-			
B*		2m	5.0m	-	-	-		-			
J		1m	5.0m	-	-	-		-			
F*		1m	5.0m	-	-	-		-			
測定機器 	模擬	延長2.25m	3.5m			×					
	躯体	延長7.5m	3.5m			×					
	最大検出深度					2.5m					

No. 28 地中レーダ探査 (通常型、200 MHz、ヨ)

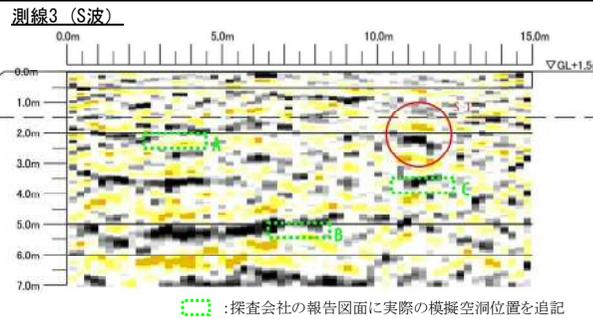
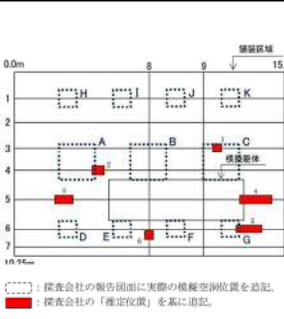
探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図
測定状況 	模擬空洞	H	1m	1.5m	1.5m	◎	全検出率 1/11=9%	0.5/0.5 = 100%	平均 100%	測線1 	
		A	2m	2.0m	-	-		-			
D		1m	2.0m	-	-	-					
I		1m	2.5m	-	-	-					
E		1m	2.5m	-	-	-	-				
C*		2m	3.5m	-	-	-	-				
K		1m	3.5m	-	-	-	-				
G*		1m	3.5m	-	-	-	有効検出率 1/1=100%	-			
B*		2m	5.0m	-	-	-		-			
J		1m	5.0m	-	-	-		-			
F*		1m	5.0m	-	-	-		-			
測定機器 	模擬	延長2.25m	3.5m			×					
	躯体	延長7.5m	3.5m			×					
	最大検出深度					1.5m					

注1)*: 模擬空洞B・C・F・Gは、模擬躯体に接して設置している。
 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞および模擬躯体を検出した測線の断面を示している。

注3) 「不明」: 深度が推定されていない場合を表す。
 注4) ◇: 水平延長が示されていない場合を表す。

参考表 模擬空洞を検出した 10 手法の一次評価結果 (4/4)

No. 29 弾性波探査 (反射法地震探査、S波測定、リ)

探査状況	検出対象	No.	幅	深さ	推定深度	検出評価	検出率	水平検出精度	誤検出率	代表断面	空洞推定位置図	
 測定状況	模擬空洞	H	1m	1.5m	-	-	全検出率 3/11=27%	-	平均 49%	 測線3 (S波)	 空洞推定位置図	
		A	2m	2.0m	3.1m	△		0.2/0.7= 29%				
		D	1m	2.0m	-	-		-				
		I	1m	2.5m	-	-	-	有効検出率 3/8=38%				-
		E	1m	2.5m	-	-	-					
		C*	2m	3.5m	1.7m	△	0.5/0.5= 100%					
		K	1m	3.5m	-	-	-	×				-
		G*	1m	3.5m	1.8m	△	0.25/1.5= 17%					
		B*	2m	5.0m	-	-	-					
		J	1m	5.0m	-	-	-					
		F*	1m	5.0m	-	-	-	-				-
 測定機器	模擬	延長2.25m	3.5m			×						
	躯体	延長7.5m	3.5m			×						
	最大検出深度					3.5m						

注1)*: 模擬空洞B・C・F・Gは、模擬躯体に接して設置している。

注3)「不明」: 深度が推定されていない場合を表す。

注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞および模擬躯体を検出した測線の断面を示している。

注4)◇: 水平延長が示されていない場合を表す。