

12. 路面下空洞（深層部）探査技術に関する屋外模型実験

Field Model Test of Deep Cavity Detection Methods under Road Surface

技術支援課 住吉卓、橋原正周

1. はじめに

道路管理において、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重要である。

建設局では、都道の主要幹線を対象に、平成 4 年度から毎年、地中レーダ探査による空洞調査を実施している。これは、路面下浅層部（本文では深度 1.5 m 以浅とする）を対象とした調査であり、すでに通常業務となっている。

一方、路面下深層部（本文では 1.5 m を超える深度とする）の空洞調査は、浅層部に比較して調査事例が少ないが、陥没が懸念される区間などで実施している。

当センターでは、建設局道路管理部からの依頼により、より低コストで精度の高い路面下空洞（深層部）調査の技術確立に向けた検討を行っている。

本文では、各種探査法の空洞探査性能を評価するために、（財）道路保全技術センターとの共同研究により実施した屋外模型実験の結果を報告する。

2. 背景

(1) 深層部の不具合に起因する道路陥没

道路陥没の原因は様々であるが、路面下深層部の空洞に起因すると考えられる道路陥没事故が発生している。

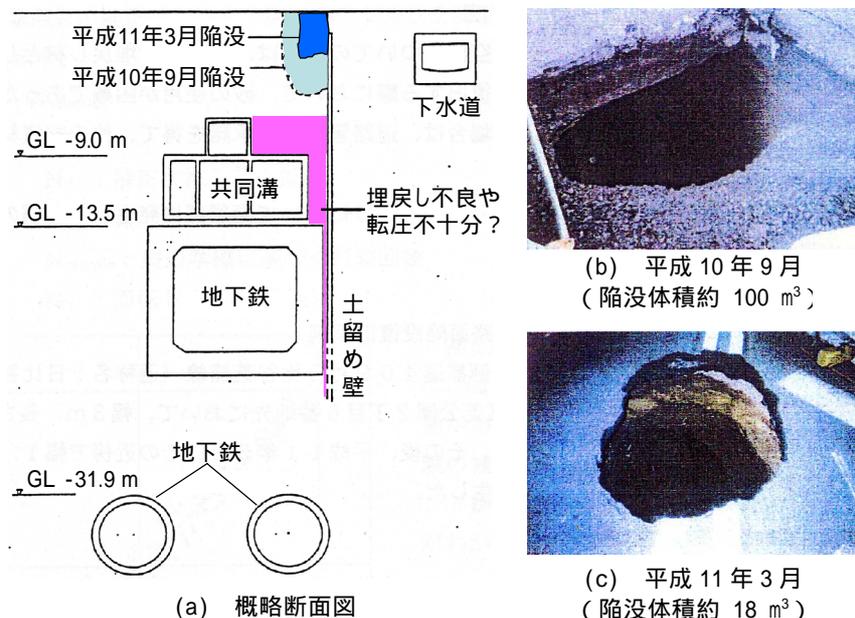


図 - 1 都道の陥没事例

都道の陥没事例を図 - 1 に示す。平成 10 年 9 月に陥没が発生したため埋戻し復旧したが、平成 11 年 3 月に同一箇所が再び陥没した。陥没の原因として、過去に開削工法で施工された地下構造物付近の埋戻し不良や地下水の出入り等によって生じた深層部の空洞や地盤の緩みが、徐々に路面に向かって上方移動しながら拡大したと推定された。

(2) 路面下空洞調査の方法と課題

路面下空洞調査の概略フローを図 - 2 に示す。

一次調査(概略調査)では、地中レーダ探査などの物理探査(地下の物質の物理的・化学的性質に応じた現象を観測・解析し、地下の状態を推測する方法)を実施し、路面を傷つけることなく、空洞の可能性のある異常箇所を抽出し、異常の平面規模を推定する。都道における現行の浅層部調査では、車載型の探査機を用い実施している(図 - 3¹⁾ (a)・(b))。

二次調査(詳細調査)では、異常箇所ではボーリングの実施後、ボアホールカメラを用いて観測したり、貫入試験などのサウンディングを実施するなどにより、空洞の有無の確認や規模の推定を行う(図 - 3¹⁾ (c)・(d))。空洞については、復旧方法を検討

する。復旧は、基本的に開削し、空洞や周辺埋設管などの状況を直接確認した上で埋戻ししている。

路面下空洞(深層部)調査については、各種探査法の空洞探査性能を把握することが、現在の大きな課題である。

3. 実験

(1) 目的と概要

屋外模型実験により各種探査法の空洞探査性能を評価し、路面下空洞(深層部)探査の技術確立のための基礎資料収集を目的とする。

実験概要は次の通りである。

「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を作製する。

募集・選定された参加者による「ブラインドテスト」、すなわち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、各参加者は模擬空洞の平面位置・深さ・規模を推定する。

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。

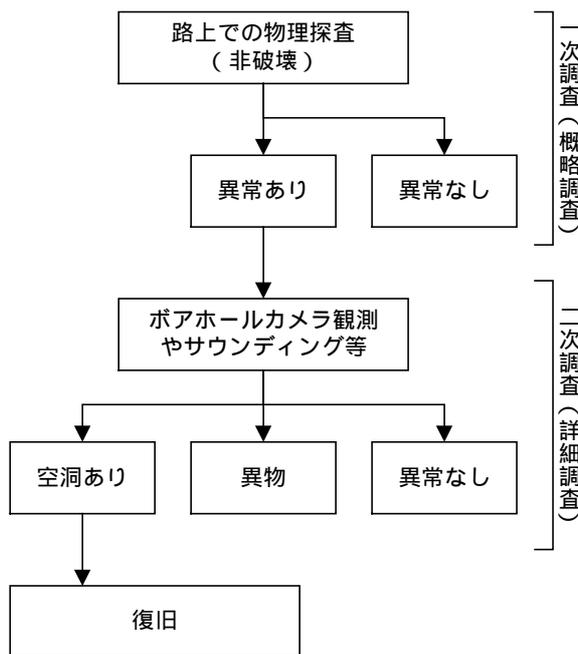
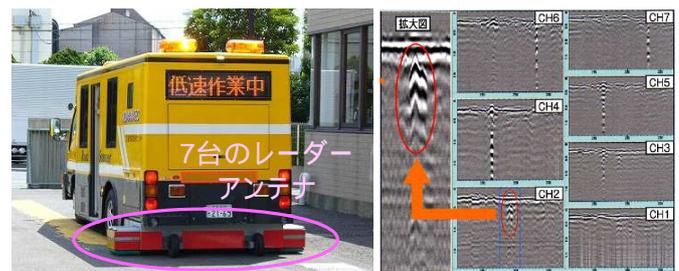
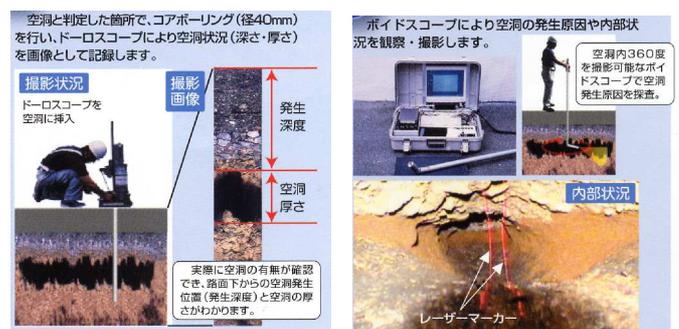


図 - 2 路面下空洞調査の概略フロー



(a) 車載型の探査機

(b) 異常反応の検出例



(c) 空洞の有無等の確認

(d) 空洞内部の観察

図 - 3 現行の浅層部調査の手法¹⁾

(2) 試験ヤード

すべての「模擬空洞」・「模擬躯体」を地下水位よりも上に設置するため、試験ヤードは写真 - 1・図 - 4 に示す盛土構造とした。地下水位は G.L. -5.0 m 程度であったため、地山を深度 G.L. -4.5 m まで掘削し、模擬空洞及び模擬躯体を設置し、埋戻し・盛土を行った。盛土上部には舗装を施し、舗装上面の高さを G.L. +1.5 m とした。

舗装及び基本測線

舗装構造は、現道で用いられている舗装構造(表層 5 cm、基層 5 cm、上層路盤 15 cm、下層路盤 25 cm の合計 50 cm)を採用した。

舗装面上には、全参加者が共通して探査する「基本測線」 ~ を設定した。基本測線及び模擬躯体の平面位置は、写真 - 1 に示すように白線でマーキングし、探査作業の円滑化を図った。

模擬空洞

現道の空洞は、地下水位以浅では空気空洞(内部が空気)、地下水位以深では水没空洞(内部が水や泥水)であると考えられる。

本実験では空気空洞を想定した発泡スチロールブロックの模擬空洞を 11 個(図 - 4 に示す A~K)埋設した。模擬空洞の形状・寸法は 2 種類で、1 m × 厚 0.5 m のもの(以下、「模擬空洞(小)」)というものを 8 個(D~K)、2 m × 厚 0.5 m のもの(以下、「模擬空洞(大)」)というものを 3 個(A~C)とした。なお模擬空洞(大)は、実際は 1 m × 2 m × 厚 0.5 m の発泡スチロールブロックを 2 個並べて設置した

ものである。

模擬空洞の鉛直配置は、深度による検出結果への影響を検証するため、舗装面からの上端深度(土被り)を、1.5 m (H)・2.0 m (A・D)・2.5 m (E・I)・3.5 m (C・G・K)・5.0 m (B・F・J) の 5 深度とした。

模擬空洞の平面配置は、模擬空洞(小)は D~G の 4 個を測線 下、H~K の 4 個を測線 下に、模擬空洞(大)は A~C の 3 個を測線 下に配置した。

上記の模擬空洞の配置は、基本測線との組合せにより、模擬躯体の存在による探査結果への影響を検証することを意図したものである。すなわち、模擬空洞(小)については、F・G は模擬躯体の影響が大きい近傍、及び J・K は影響が小さい遠方であると想定し、測線 (近傍) 及び測線 (遠方) の探査結果を比較することとした。模擬空洞(大)については、B・C が模擬躯体の近傍及び遠方を兼ねていると想定し、測線 (近傍) 及び測線 (遠方) の探査結果を比較することとした。その他の模擬空洞(A・D・E・H・I)は、いずれも模擬躯体から遠方であると想定した。

模擬躯体

地下鉄や共同溝などの地下躯体を想定し、寸法 0.2~0.26 m × 1.5 m × 2.23~2.27 m の鉄筋コンクリート版 15 枚を用いて門型に構築した模擬躯体を埋設した。門型の内部は、下記 に示す埋土材料で埋戻した。



(a) 全景



(b) 舗装面

写真 - 1 試験ヤードの写真

【平面図】

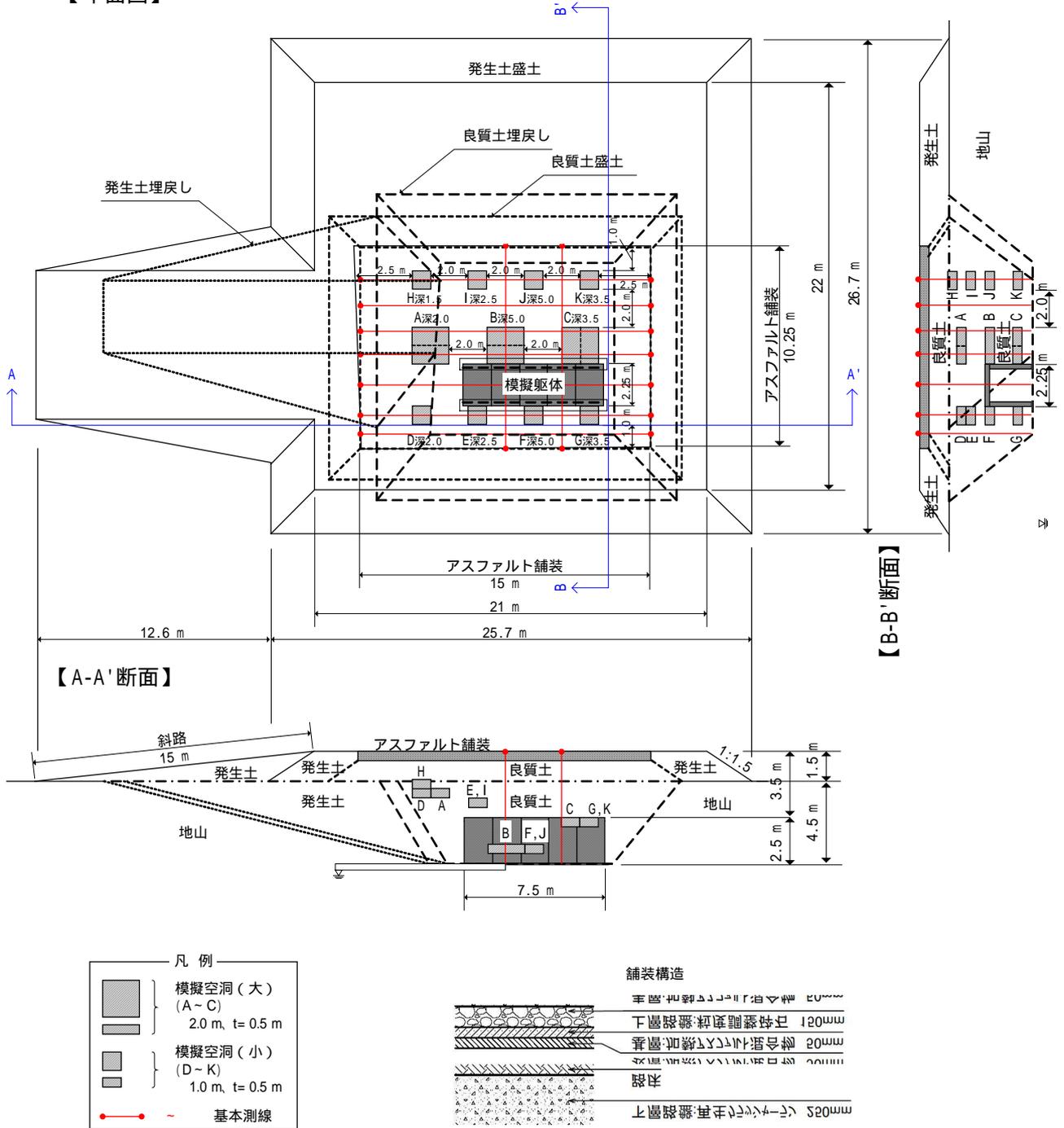


図 - 4 試験ヤードの概略

模擬躯体の土被りは3.5mとした。これは、道路法施行規則などの定めにより、道路を占有する大型の地下施設の土被りが、原則として3.5m以上とされていることから設定した。

埋土材料

埋戻し・盛土に用いた埋土材料(図-4に示す「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%の地盤材料で、工学的分類「細粒分まじり礫質砂」を使用した。この埋土材料を含水比3~6%程度の状態で、コーン指数 $q_c = 392 \text{ kN/m}^2$ 以上、土の単位重量 17 kN/m^3 以上となるように振動ローラ及びランマで均一に締固めた。

なお地山の土質は、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は粘土混り砂であり、盛土の外周部や斜路部には掘削時の発生土(玉石混り砂礫)を用いた。

(3) 参加者

参加者は、「探査技術を有する会社(開発段階等でも可)」及び「営業所等が東京近郊にある会社を中心に、本実験に自費で参加できる会社」という観点から募集・選定した。具体的には次の通りである。

東京都の競争入札参加資格者のうち「地質調査」

や「一般土木工事(格付A)」の登録上位の会社など70社に対し、電話・FAX等で実験の説明会開催を案内した。

説明会を開催(出席26社)し、出席者から実験参加の可否について判断してもらった。

参加希望の回答があった15社を参加者として実験を実施した。この他、試験ヤード施工時の現場管理の一環として地中レーダ探査を実施した1社も参加したが、ブライントテストが成立しないため参考扱いとし、評価対象外とした。

15社中2社については実験終了後の結果報告が得られなかったため、これら2社を除いた13社を実験結果の評価対象とした。

なお、複数の会社が共同で実験に参加した場合も、本文では1社としている。

(4) 探査手法

探査手法は、路面の削孔等を伴わない(非破壊の)地上からの物理探査に限るという条件のもと、参加者が自由に選定した。

評価対象とした13社の探査手法数は、表-1に示す計32手法である。参加者が選定した探査法は、電気探査・電磁探査・地中レーダ探査・弾性波探査・磁気探査に分類される。

表-1 探査手法集計表

探査手法		参加者(評価対象とする13社)											合計				
		イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	チ	リ	ヌ	ル		ヲ	ワ		
電気探査																	3
電磁探査																	5
地中レーダ探査	低周波型 (本文での便宜的呼称)	35 MHz															1
		75 MHz															1
		100 MHz															3
		200 MHz															6
		250 MHz															2
		300 MHz															2
		350 MHz															2
		400 MHz															2
	連続波レーダ探査															1	
弾性波探査	表面波探査																2
	反射法地震探査																1
磁気探査																	1
合計		3	4	2	1	2	1	2	5	5	1	3	1	2			32

(*) 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。

表 - 1 を見ると、地中レーダ探査を選定した参加者が多く、その内訳は、送信する電磁波の周波数を変化させる方式の連続波レーダ探査を除き、中心周波数は 35 ~ 400 MHz である。一般に地中レーダ探査は、送信する電磁波の中心周波数が高い場合、空洞等の検出精度は高いが探査可能深度は浅くなり、逆に中心周波数が低い場合、検出精度は低いが探査可能深度は深くなる傾向がある。現行の路面下空洞（浅層部）調査では、中心周波数が 500 MHz 程度の地中レーダ探査が実施されている。

つまり、路面下深層部の模擬空洞を探査する今回の実験には、浅層部調査時よりも中心周波数が低い地中レーダ探査が適していると参加者が判断したことを示唆している。

(5) 実施

参加者はブラインドテスト、すなわち 模擬空洞の位置（平面位置・深度）と形状・寸法や個数、及び 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。ただし上記 以外の情報、すなわち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 ~ 5 m 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。参加者に提供した情報のイメージを図 - 5 に示す。

参加者は、定められた 基本測線上を、各々が選定した手法を用いて探査し（測線の自主追加も可）模擬空洞の位置（水平位置・深度）規模（延長・厚さ）を推定した。

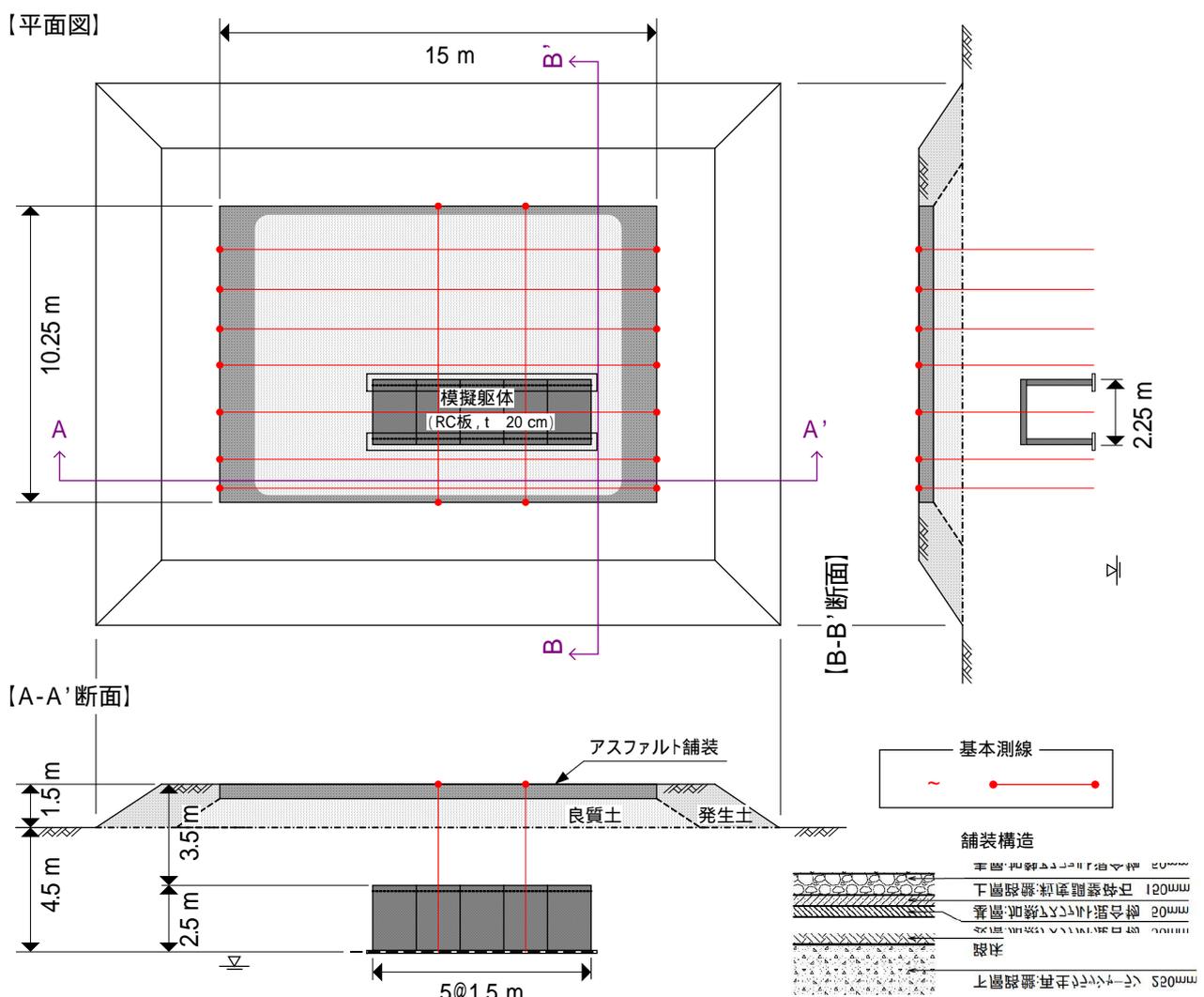


図 - 5 参加者への提供情報のイメージ

4. 結果及び評価

各参加者から得られた 32 手法の探査結果について、次の 3 段階で性能評価を行った。

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・算出及び評価。

二次評価

評価対象とする手法の絞り込みと、評価指標に基づいた探査法別の考察・比較。

総合評価

路面下空洞（深層部）探査法としての総合的な性能評価。

(1) 一次評価

1) 模擬空洞を「検出」した手法の抽出

原則として、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 1.5 m 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」の判定を行った。

また磁気探査（表 - 1、ヲ）は、水平方向の異常のみを探査し、深さ方向を探査しない仕様の手法であり、他手法との比較が難しかったため、本文では評価をしないこととする。

2) 評価指標の設定

参加者が推定した空洞、及び模擬躯体の検出状況に対し、次のように指標を設定し評価した。

検出誤差

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

検出誤差

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

ここに深度は、模擬空洞及び推定空洞の上端の深度とする。

検出誤差の考え方を図 - 6 に示す。検出誤差の値が正の場合は空洞の推定深度が模擬空洞よりも深く、負の場合は推定深度が模擬空洞よりも浅いことを意味している。

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。

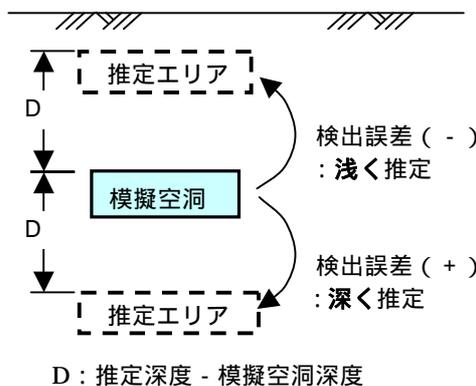
- : 10% 未満
- : 10% 以上 20% 未満
- : 20% 以上 30% 未満
- : 30% 以上
- : 検出しなかった

全検出率

模擬空洞の検出数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

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



D : 推定深度 - 模擬空洞深度

図 - 6 「検出誤差」の考え方

水平的中率

模擬空洞の水平方向の検出精度を示す指標として、「水平的中率」を次式のように定義した。

水平的中率

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

水平的中率の算出例を図 - 7 に示す。

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「本実験での最大探査深度」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。

有効検出率

各手法の持つ探査可能深度以浅での、模擬空洞の検出性能を表す指標として、次式のように「有効検出率」を定義した。

有効検出率

$$= \frac{\text{「本実験での最大検出深度」以浅で検出した模擬空洞の数}}{\text{「本実験での最大検出深度」以浅の模擬空洞の数}} \times 100 (\%)$$

有効検出率の算出例を図 - 8 に示す。

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。

模擬躯体の影響

模擬躯体の近傍（測線・）及び遠方（測線・）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。

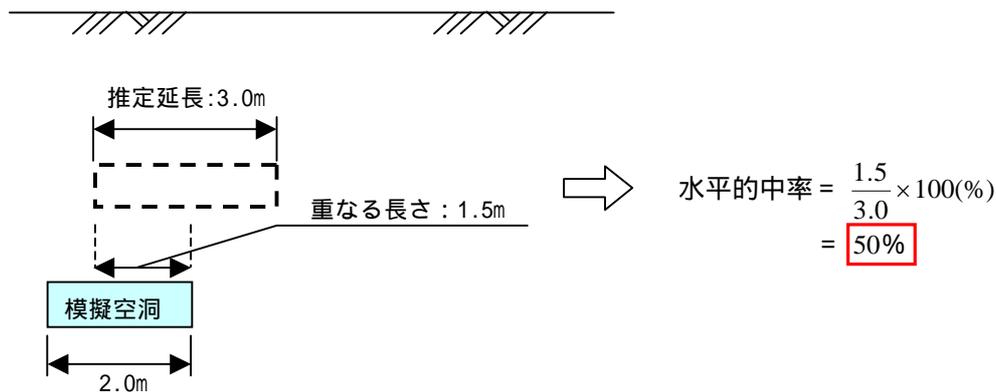


図 - 7 「水平的中率」の算出例

空洞No.	深さ	検出評価
H	1.5m	
A	2.0m	
D	2.0m	
I	2.5m	
E	2.5m	-
C	3.5m	-
K	3.5m	-
G	3.5m	-
B	5.0m	-
J	5.0m	-
F	5.0m	-

本実験での最大探査深度以浅の模擬空洞数: 5個

最大探査深度=2.5m

検出した模擬空洞の数: 4個
誤差は考慮しない

$$\text{有効検出率} = \frac{4}{5} \times 100 (\%) = 80 \%$$

図 - 8 「有効検出率」の算出例

3) 一次評価の結果

全 32 手法について算出した各指標値を表 - 2 に一覧する。表 - 2 より、全 11 個の模擬空洞のうち 1 個以上検出した手法は、19 手法であった。これら 19 手法各々の一次評価結果を整理し表 - 3 に示す。以下、表 - 2・表 - 3 について述べる。

表 - 2 で本実験での最大探査深度を見ると、最も深い深度 5.0 m の模擬空洞を検出した手法は、電気探査 (No.1)・地中レーダ探査 (No.4・12・16)・連続波レーダ探査 (No.17)・表面波探査 (No.18)・反射法地震探査 (No.19) であった。このうち全検出率は、連続波レーダ探査 (No.17) が 73 % で最も高く、以下電気探査 (No.1) の 64 %、表面波探査 (No.18)・反射法地震探査 (No.19) の 45 %、地中レーダ探査 (No.4・12・16) の 27 ~ 36 % と続く。また、このうち水平的中率 (平均値) は、地中レーダ探査 (No.12) が 80 % で最も高く、以下地中レーダ探査 (No.16) の 72 %、地中レーダ探査 (低周波

型、No.4) の 57 %、反射法地震探査 (No.19) の 53 %、連続波レーダ探査 (No.17) の 52 %、と続く。

本実験で多くの参加者が選定した探査法である地中レーダ探査の結果 (表 - 2) に着目すると、低周波型を除く中心周波数 200 ~ 400 MHz の手法では、本実験での最大探査深度は 2.5 m が多く (No.6 ~ 9・11・13・14)、また、有効検出率が 100 % (No.6・7・10・13・14)、水平的中率が 90 % 以上 (No.6・7・9・11・14・15) と、数値が高い手法が多い。

検出評価 (表 - 3) を見ると、連続波レーダ探査 (No.17) は、深度 3.5 m・5.0 m の模擬空洞 (小) で未検出 (K・J・F) が見られる以外、すべての模擬空洞及び模擬躯体を検出しており、また深さ方向の検出誤差が小さい。電気探査 (No.1) 及び表面波探査 (No.18) は、模擬空洞を検出しているが検出誤差は大きい。地中レーダ探査 (200 ~ 400 MHz、No.6 ~ 16) は、深度 2.5 m 以浅で検出した模擬空洞の検出誤差が小さい手法があった (No.6・7・14 など)。

表 - 2 一次評価による各指標値の一覧

探査手法		参加者	全検出率	有効検出率	水平的中率 (平均)	本実験での 最大探査深度	No.	
電気探査		口	64.0%	64.0%	19.0%	5.0m	1	
		チ	-	-	-	-		
		リ	-	-	-	-		
電磁探査		ニ	-	-	-	-		
		チ	-	-	-	-		
		リ	-	-	-	-		
		又	-	-	-	-		
		ホ	18.0%	67.0%	74.0%	2.0m	2	
地中レーダ探査	低周波型 (本文での便宜的呼称)	35MHz						
		75MHz						
		チ	-	-	-	-		
	200MHz	口	36.0%	80.0%	96.0%	2.5m	3	
		チ	27.0%	27.0%	57.0%	5.0m	4	
		ワ	18.0%	25.0%	65.0%	3.5m	5	
		イ	-	-	-	-		
		口	45.0%	100.0%	96.0%	2.5m	6	
		ホ	45.0%	100.0%	98.0%	2.5m	7	
		ト	36.0%	80.0%	80.0%	2.5m	8	
		リ	36.0%	80.0%	100.0%	2.5m	9	
		ル	27.0%	100.0%	68.0%	2.0m	10	
		ト	36.0%	80.0%	92.0%	2.5m	11	
		ワ	36.0%	36.0%	80.0%	5.0m	12	
		イ	45.0%	100.0%	72.0%	2.5m	13	
		チ	-	-	-	-		
		350MHz	ハ	45.0%	100.0%	100.0%	2.5m	14
		ヘ	18.0%	67.0%	100.0%	2.0m	15	
		400MHz	イ	-	-	-	-	
リ	36.0%	36.0%	72.0%	5.0m	16			
連続波レーダ探査	ハ	73.0%	73.0%	52.0%	5.0m	17		
弾性波探査	表面波探査	口	-	-	-	-		
	ル	45.0%	45.0%	33.0%	5.0m	18		
	反射法地震探査	リ	45.0%	45.0%	53.0%	5.0m	19	
磁気探査		ヲ	評価対象外 ^(*)					

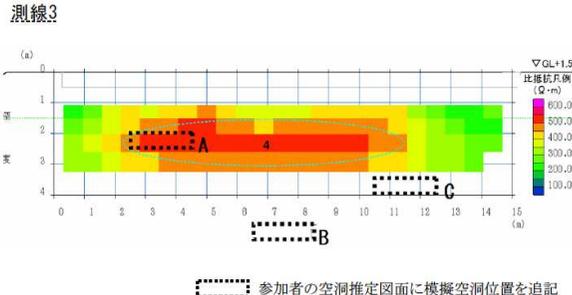
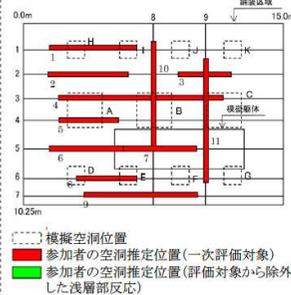
注1) 地中レーダ探査の数値 (MHz) は、送信する電磁波の中心周波数を示す。

注2) "-" は、解析の結果、あるいは測定時に有効なデータが取得できなかったり機器が故障したなど、何らかの理由により模擬空洞を1つも検出できなかったことを示す。

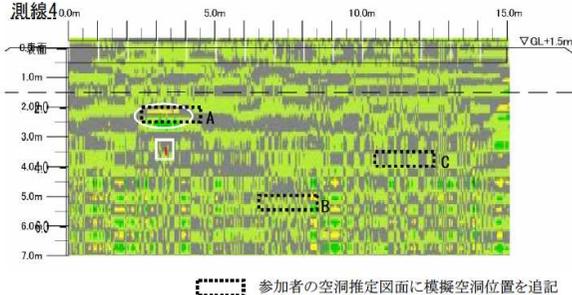
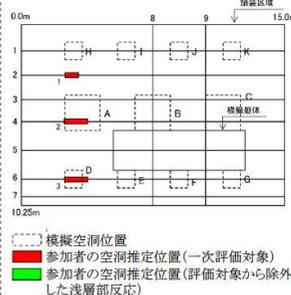
注3) (*) 今回実施した磁気探査 (ヲ) は、水平位置のみを異常を探査する (深さ方向を探査しない) 仕様であり、他手法との比較が難しいため、本文では評価しない。

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (1/7)

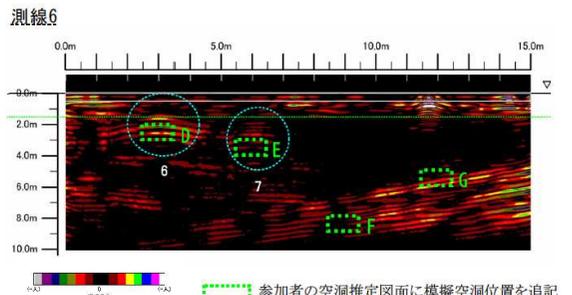
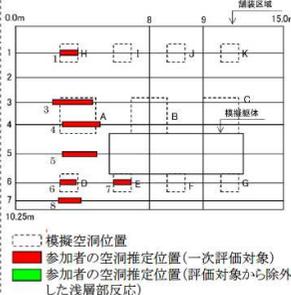
No. 1 電気探査 (口)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.0~3.0	△	全検出率 7/11 = 64%	1/5 = 20%	 <p>測線3</p>	
		A	2.0	2	1.0~3.0	□		2/9.5 = 21%		
D		1.0	2	1.0~3.0	△	0.5/3.5 = 14%				
I		1.0	2.5	1.0~3.0	△	有効検出率 7/11 = 64%	1/5 = 20%			
E		1.0	2.5	1.0~3.0	△		1/3.5 = 29%			
C*		2.0	3.5	1.0~3.0	△	1/9.5 = 11%	平均 19%			
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	1.0~3.0	△	2/9.5 = 21%				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬躯体	延長2.25	3.5			×					
測定機器	延長7.5	3.5			×					
本実験での最大探査深度							5.0m			

No. 2 地中レーダ探査 (中心周波数35 MHz) (木)

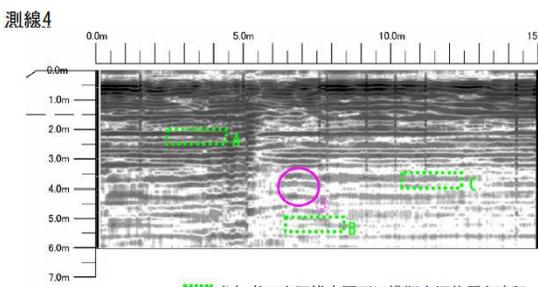
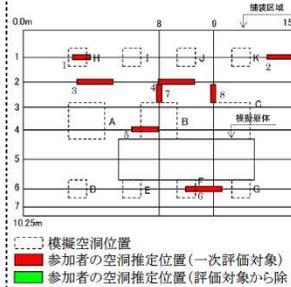
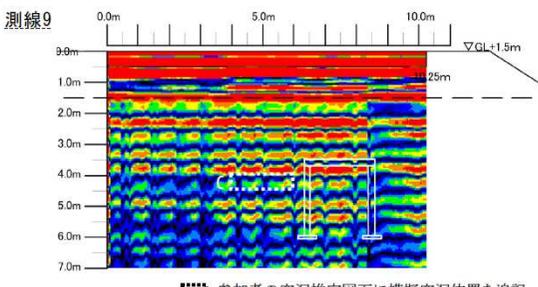
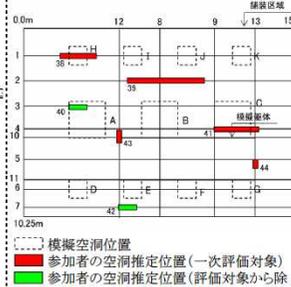
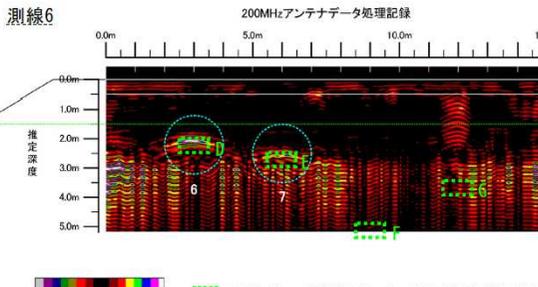
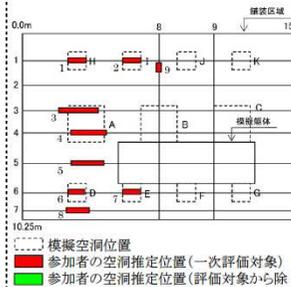
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	-	-	全検出率 2/11 = 18%	- = -	 <p>測線4</p>	
		A	2.0	2	2.0~2.2	◎		1/1.4 = 71%		
D		1.0	2	2.0~2.2	◎	1/1.3 = 77%				
I		1.0	2.5	-	-	有効検出率 2/3 = 67%	-			
E		1.0	2.5	-	-		-			
C*		2.0	3.5	-	-	-	平均 74%			
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	-	-	-				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬躯体	延長2.25	3.5			×					
測定機器	延長7.5	3.5			×					
本実験での最大探査深度							2.0m			

No. 3 地中レーダ探査 (中心周波数100 MHz) (口)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.4~1.6	◎	全検出率 4/11 = 36%	1/1 = 100%	 <p>測線6</p>	
		A	2.0	2	1.9~2.0	◎		1.8/2.2 = 82%		
D		1.0	2	1.9~2.0	◎	0.9/0.9 = 100%				
I		1.0	2.5	-	-	有効検出率 4/5 = 80%	1/1 = 100%			
E		1.0	2.5	2.4~2.5	◎		-			
C*		2.0	3.5	-	-	-	平均 96%			
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	-	-	-				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬躯体	延長2.25	3.5			×					
測定機器	延長7.5	3.5			○					
本実験での最大探査深度							2.5m			

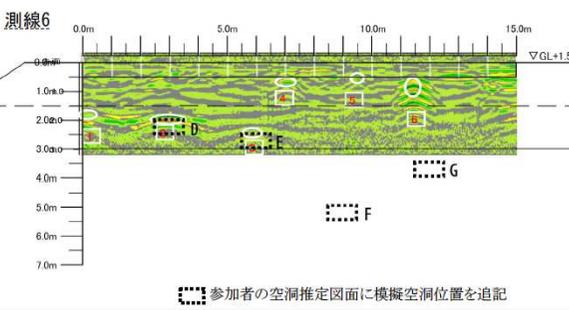
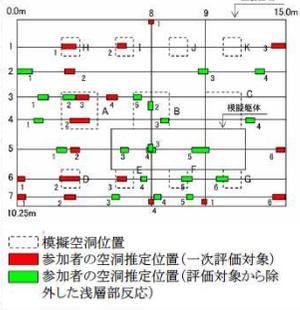
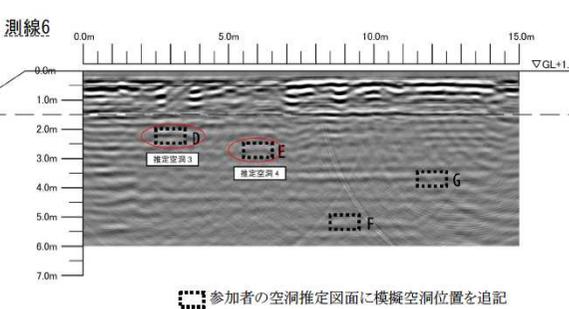
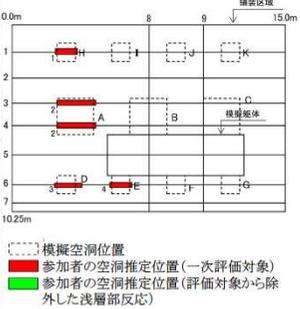
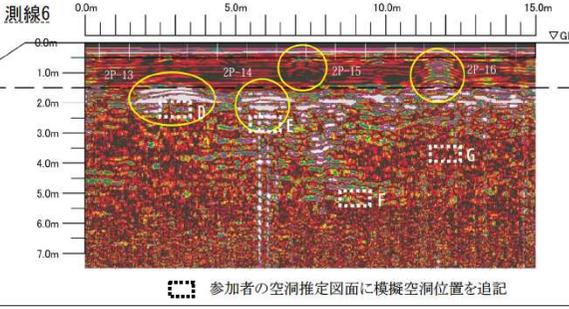
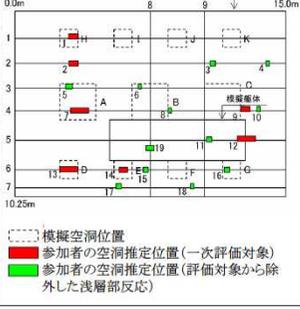
注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (2/7)

No. 4 地中レーダ探査 (中心周波数100 MHz) (チ)		No. 5 地中レーダ探査 (中心周波数100 MHz) (フ)		No. 6 地中レーダ探査 (中心周波数200 MHz) (ロ)									
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図			
	検出評価	模擬空洞	H	1.0	1.5	1.6~1.8	◎	全検出率 3/11 = 27% 有効検出率 3/11 = 27%	0.8/1 = 80%				
			A	2.0	2	-	-		-			-	
			D	1.0	2	-	-		-			-	
			I	1.0	2.5	-	-		-			-	
			E	1.0	2.5	-	-		-			-	
			C*	2.0	3.5	-	-		-			-	
			K	1.0	3.5	-	-		-			-	
			G*	1.0	3.5	-	-		-			-	
			B*	2.0	5	3.5~4.1	△		△			1/1.5 = 67%	
			J	1.0	5	-	-		-			-	
			F*	1.0	5	4.7~不明	◎		◎			0.5/2 = 25%	
			模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-		-			-	×
			模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-		-			-	×
本実験での最大探査深度								5.0m					
	検出評価	模擬空洞	H	1.0	1.5	1.0~1.5	△	全検出率 2/11 = 18% 有効検出率 2/8 = 25%	1/2 = 50%				
			A	2.0	2	-	-		-			-	
			D	1.0	2	-	-		-			-	
			I	1.0	2.5	-	-		-			-	
			E	1.0	2.5	-	-		-			-	
			C*	2.0	3.5	3.5~4.0	◎		◎			2/2.5 = 80%	
			K	1.0	3.5	-	-		-			-	
			G*	1.0	3.5	-	-		-			-	
			B*	2.0	5	-	-		-			-	
			J	1.0	5	-	-		-			-	
			F*	1.0	5	-	-		-			-	
			模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-		-			-	×
			模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-		-			-	×
本実験での最大探査深度								3.5m					
	検出評価	模擬空洞	H	1.0	1.5	1.4~1.6	◎	全検出率 5/11 = 45% 有効検出率 5/5 = 100%	1/1 = 100%				
			A	2.0	2	1.9~2.0	◎		◎			1.8/2.2 = 82%	
			D	1.0	2	1.9~2.0	◎		◎			0.9/0.9 = 100%	
			I	1.0	2.5	2.4~2.6	◎		◎			1/1 = 100%	
			E	1.0	2.5	2.4~2.5	◎		◎			1/1 = 100%	
			C*	2.0	3.5	-	-		-			-	
			K	1.0	3.5	-	-		-			-	
			G*	1.0	3.5	-	-		-			-	
			B*	2.0	5	-	-		-			-	
			J	1.0	5	-	-		-			-	
			F*	1.0	5	-	-		-			-	
			模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-		-			-	×
			模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-		-			-	×
本実験での最大探査深度								2.5m					

注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2)代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

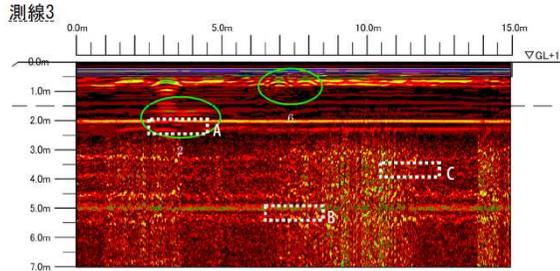
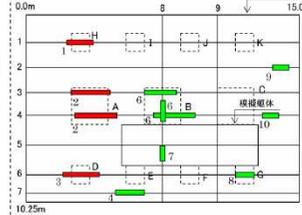
表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (3/7)

No. 7 地中レーダ探査 (中心周波数200 MHz) (ホ)										
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.4~1.8	◎	全検出率 5/11 = 45%	0.8/0.8 = 100%	測線G 	空洞推定平面図 
		A	2.0	2	1.8~2.0	◎		0.7/0.7 = 100%		
D		1.0	2	1.8~2.0	○	1/1.1 = 91%				
I		1.0	2.5	2.3~2.6	◎	0.5/0.5 = 100%				
E		1.0	2.5	2.2~2.5	○	0.5/0.5 = 100%				
C*		2.0	3.5	-	-	-	-	有効 検出率 5/5 = 100%		
K		1.0	3.5	-	-	-	-			
G*		1.0	3.5	-	-	-	-			
B*		2.0	5	-	-	-	-			
J		1.0	5	-	-	-	-			
F*		1.0	5	-	-	-	-	-		
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記		
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.5m			
No. 8 地中レーダ探査 (中心周波数200 MHz) (ト)										
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.28~不明	○	全検出率 4/11 = 36%	1/1.22 = 82%	測線G 	空洞推定平面図 
		A	2.0	2	1.74~不明	○		2/2.19 = 91%		
D		1.0	2	1.72~不明	○	1/1.53 = 65%				
I		1.0	2.5	-	-	-		-		
E		1.0	2.5	2.16~不明	○	1/1.23 = 81%				
C*		2.0	3.5	-	-	-	-	有効 検出率 4/5 = 80%		
K		1.0	3.5	-	-	-	-			
G*		1.0	3.5	-	-	-	-			
B*		2.0	5	-	-	-	-			
J		1.0	5	-	-	-	-			
F*		1.0	5	-	-	-	-	-		
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記		
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.5m			
No. 9 地中レーダ探査 (中心周波数200 MHz) (リ)										
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.1	□	全検出率 4/11 = 36%	0.5/0.5 = 100%	測線G 	空洞推定平面図 
		A	2.0	2	1.5	□		1/1 = 100%		
D		1.0	2	1.5	□	1/1 = 100%				
I		1.0	2.5	-	-	-		-		
E		1.0	2.5	1.8	□	0.5/0.5 = 100%				
C*		2.0	3.5	-	-	-	-	有効 検出率 4/5 = 80%		
K		1.0	3.5	-	-	-	-			
G*		1.0	3.5	-	-	-	-			
B*		2.0	5	-	-	-	-			
J		1.0	5	-	-	-	-			
F*		1.0	5	-	-	-	-	-		
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記		
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.5m			

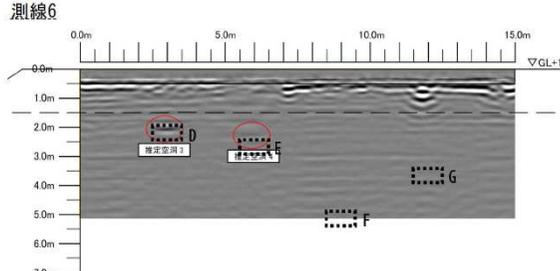
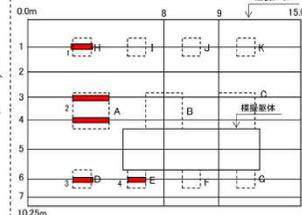
注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (4/7)

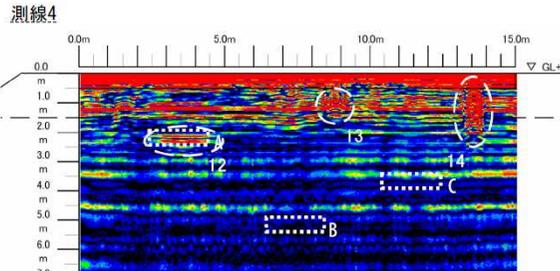
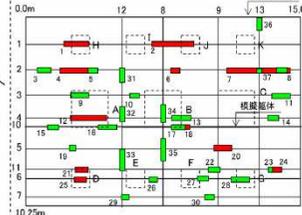
No. 10 地中レーダ探査 (中心周波数200 MHz) (ル)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図			
											検出率	水平的中率	
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.2~2.0	□	全検出率 3/11 = 27%	1/1.5 = 67%	測線3 	空洞推定平面図 			
		A	2.0	2	1.5~2.3	△		1.9/2.2 = 86%					
D		1.0	2	1.5~2.0	□	1/2 = 50%							
I		1.0	2.5	-	-	-	有効検出率 3/3 = 100%	-					
E		1.0	2.5	-	-	-							
C*		2.0	3.5	-	-	-							
測定機器 		本実験での最大探査深度	K	1.0	3.5	-	-	-			-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記	参加者の空洞推定位置(評価対象から除外した浅層部反応)
			G*	1.0	3.5	-	-	-					
			B*	2.0	5	-	-	-					
			J	1.0	5	-	-	-					
			F*	1.0	5	-	-	-					
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-	-	-				
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-	-	-				
本実験での最大探査深度								2.0m					

No. 11 地中レーダ探査 (中心周波数250 MHz) (ト)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図			
											検出率	水平的中率	
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.35~不明	○	全検出率 4/11 = 36%	1/1.2 = 83%	測線6 	空洞推定平面図 			
		A	2.0	2	1.8~不明	○		2/2 = 100%					
D		1.0	2	1.76~不明	○	0.95/1 = 95%							
I		1.0	2.5	-	-	-	有効検出率 4/5 = 80%	0.9/1 = 90%					
E		1.0	2.5	2.2~不明	○	-							
C*		2.0	3.5	-	-	-							
測定機器 		本実験での最大探査深度	K	1.0	3.5	-	-	-			-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記	参加者の空洞推定位置(評価対象から除外した浅層部反応)
			G*	1.0	3.5	-	-	-					
			B*	2.0	5	-	-	-					
			J	1.0	5	-	-	-					
			F*	1.0	5	-	-	-					
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-	-	-				
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-	-	-				
本実験での最大探査深度								2.5m					

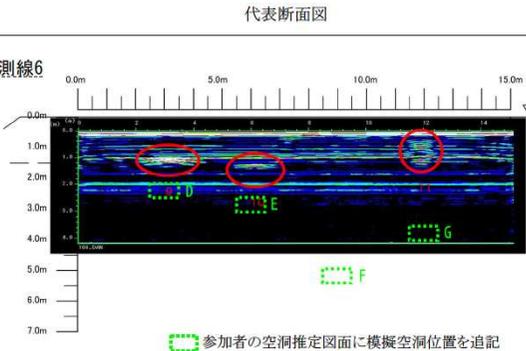
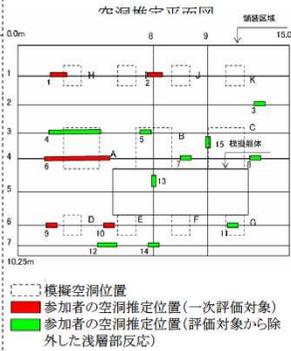
No. 12 地中レーダ探査 (中心周波数250 MHz) (ワ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図			
											検出率	水平的中率	
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.5~2.2	□	全検出率 4/11 = 36%	1/1.15 = 87%	測線4 	空洞推定平面図 			
		A	2.0	2	2.0~2.5	□		2/2 = 100%					
D		1.0	2	2.5~2.7	○	0.7/0.7 = 100%							
I		1.0	2.5	-	-	-	有効検出率 4/11 = 36%	-					
E		1.0	2.5	-	-	-							
C*		2.0	3.5	-	-	-							
測定機器 		本実験での最大探査深度	K	1.0	3.5	-	-	-			-	参加者の空洞推定図面に模擬空洞位置を追記	参加者の空洞推定位置(評価対象から除外した浅層部反応)
			G*	1.0	3.5	-	-	-					
			B*	2.0	5	-	-	-					
			J	1.0	5	2.5~3.0	△	0.7/2.2 = 32%					
			F*	1.0	5	-	-	-					
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	○	-	-	-				
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	○	-	-	-				
本実験での最大探査深度								5.0m					

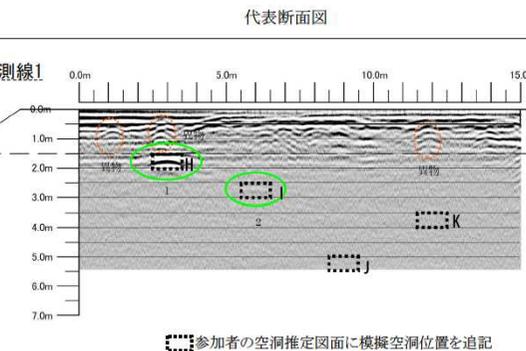
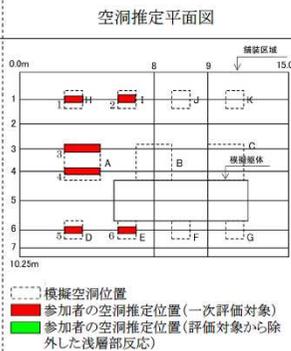
注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (5/7)

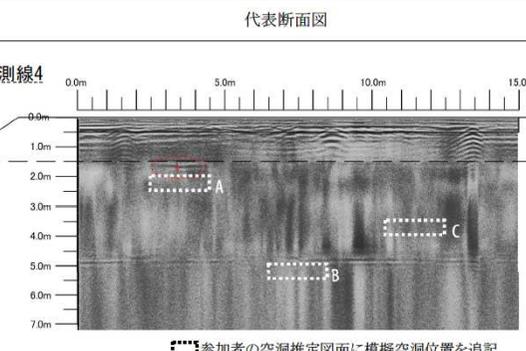
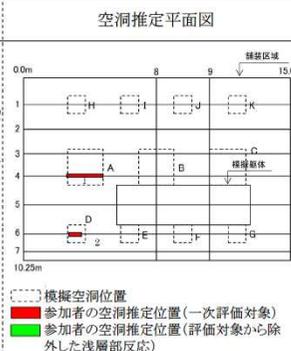
No. 13 地中レーダ探査 (中心周波数300 MHz) (イ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	0.73~不明	△	全検出率 5/11 = 45%	1/1 = 100%	 <p>測線6</p>	
		A	2.0	2	1.0~不明	△		1/2.78 = 36%		
D		1.0	2	0.98~不明	△	1/1.96 = 51%				
I		1.0	2.5	1.24~不明	△	0.88/1 = 88%				
E		1.0	2.5	1.24~不明	△	0.94/1.08 = 87%				
C*		2.0	3.5	-	-	-	有効 検出率 5/5 = 100%	-		
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	-	-	-				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬 躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-			
	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.5m			

No. 14 地中レーダ探査 (中心周波数350 MHz) (ハ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.5~不明	◎	全検出率 5/11 = 45%	1/1 = 100%	 <p>測線1</p>	
		A	2.0	2	2.0~不明	◎		2/2 = 100%		
D		1.0	2	2.0~不明	◎	1/1 = 100%				
I		1.0	2.5	2.5~不明	◎	1/1 = 100%				
E		1.0	2.5	2.5~不明	◎	1/1 = 100%				
C*		2.0	3.5	-	-	-	有効 検出率 5/5 = 100%	-		
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	-	-	-				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬 躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-			
	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.5m			

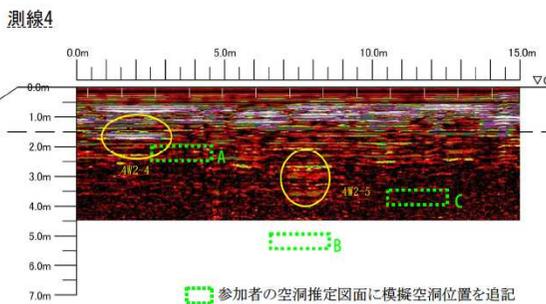
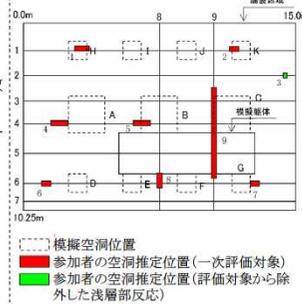
No. 15 地中レーダ探査 (中心周波数350 MHz) (ヘ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	-	-	全検出率 2/11 = 18%	-	 <p>測線4</p>	
		A	2.0	2	1.5~1.6	□		2/2 = 100%		
D		1.0	2	1.5~1.6	□	0.6/0.6 = 100%				
I		1.0	2.5	-	-	-				
E		1.0	2.5	-	-	-				
C*		2.0	3.5	-	-	-	有効 検出率 2/3 = 67%	-		
K		1.0	3.5	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-				
B*		2.0	5	-	-	-				
J		1.0	5	-	-	-				
F*		1.0	5	-	-	-	-			
模擬 躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-			
	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							2.0m			

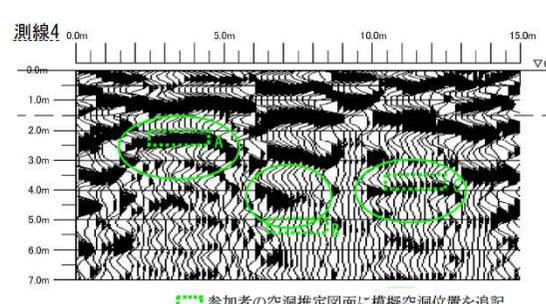
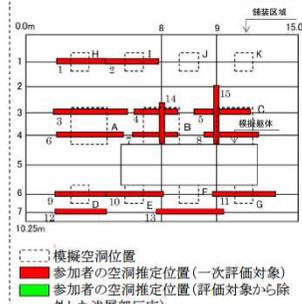
注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (6/7)

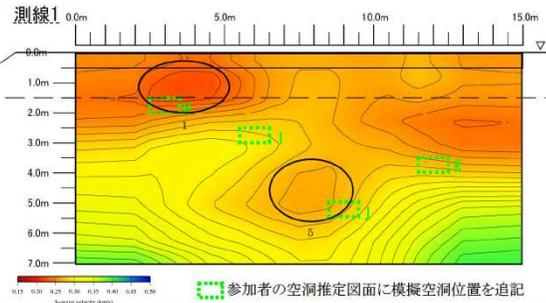
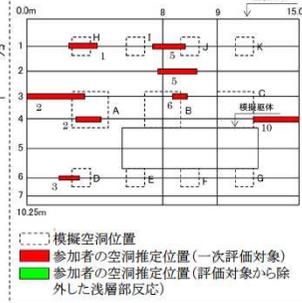
No. 16 地中レーダ探査 (中心周波数400 MHz) (リ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.2	□	全検出率 4/11 = 36%	0.7/0.8 = 88%	測線4 	空洞推定平面図 
		A	2.0	2	-	-		-		
D		1.0	2	-	-	-				
I		1.0	2.5	-	-	-				
E		1.0	2.5	-	-	-	有効検出率 4/11 = 36%	2/5 = 40%		
C*		2.0	3.5	2.4~2.6	△	-		0.3/0.5 = 60%		
K		1.0	3.5	2.8	□	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-	-	-		
B*		2.0	5	2.7	△	-	1/1 = 100%	-		
J		1.0	5	-	-	-	-	-		
F*		1.0	5	-	-	-	-	-		
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-			
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-			
本実験での最大探査深度							5.0m	-	-	

No. 17 連続波レーダ探査 (ハ)

探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	1.5~不明	◎	全検出率 8/11 = 73%	1/2.6 = 38%	測線4 	空洞推定平面図 
		A	2.0	2	2.0~不明	◎		2/4 = 50%		
D		1.0	2	2.1~不明	◎	1/2.8 = 36%				
I		1.0	2.5	2.1~不明	○	1/3 = 33%				
E		1.0	2.5	2.6~不明	◎	2/2.2 = 91%	有効検出率 8/11 = 73%	1.9/2.6 = 73%		
C*		2.0	3.5	4.2~不明	□	-		-		
K		1.0	3.5	-	-	-		-		
G*		1.0	3.5	3.5~不明	◎	-	1/3.6 = 28%	-		
B*		2.0	5	3.7~不明	□	-	1.4/2 = 70%	-		
J		1.0	5	-	-	-	-	-		
F*		1.0	5	-	-	-	-	-		
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	○	-			
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	○	-			
本実験での最大探査深度							5.0m	-	-	

No. 18 表面波探査 (ル)

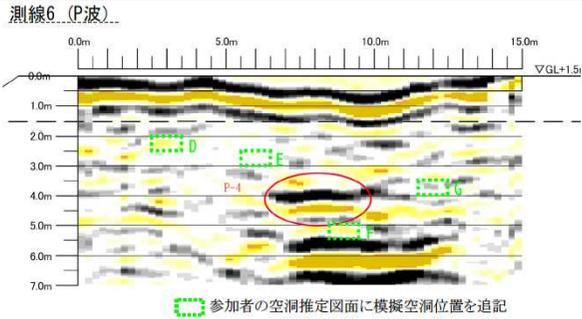
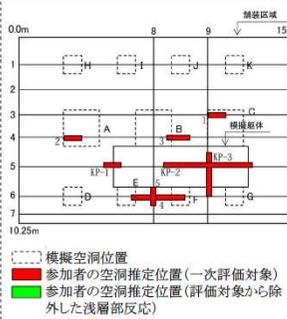
探査状況	検出対象	記号	幅 (m)	深度 (m)	推定深度 (m)	検出評価	検出率	水平的中率	代表断面図	空洞推定平面図	
測定状況 	検出評価 模擬空洞	H	1.0	1.5	0.6~1.6	△	全検出率 5/11 = 45%	1/2.3 = 43%	測線1 	空洞推定平面図 	
		A	2.0	2	1.2~2.3	△		0.8/3.3 = 24%			
D		1.0	2	0.6~1.8	△	0.4/1.1 = 36%		-			
I		1.0	2.5	-	-	-		-			
E		1.0	2.5	-	-	-	-	有効検出率 5/11 = 45%			-
C*		2.0	3.5	-	-	-	-				-
K		1.0	3.5	-	-	-	-				
G*		1.0	3.5	-	-	-	-	-			
B*		2.0	5	0.5~1.1	△	-	0.5/1 = 50%	-			
J		1.0	5	3.9~5.2	□	-	0.2/1.7 = 12%	-			
F*		1.0	5	-	-	-	-	-			
模擬躯体	延長2.25	3.5	-	-	-	×	-				
模擬躯体	延長7.5	3.5	-	-	-	×	-				
本実験での最大探査深度							5.0m	-	-		

注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞

注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

表 - 3 模擬空洞を検出した 19 手法の一次評価結果 (7/7)

No. 19 反射法地震探査 (口)

探査状況		検出対象					検出評価		水平的中率		代表断面図	空洞推定平面図	
 測定状況  測定機器	検出評価	模擬空洞					全検出率 5/11 = 45%	有効 検出率 5/11 = 45%	平均 53%	測線6 (P波)			
		H	1.0	1.5	-	-							-
A		2.0	2	2.5	-	□							1/1 = 100%
D		1.0	2	-	-	-							-
I		1.0	2.5	-	-	-							-
E		1.0	2.5	4	△	-							0.25/3 = 8%
C*		2.0	3.5	3.0~3.3	○	-							1/1 = 100%
K		1.0	3.5	-	-	-							-
G*		1.0	3.5	-	-	-							-
B*		2.0	5	3.5	△	-							0.3/1 = 30%
J		1.0	5	-	-	-							-
F*	1.0	5	4	□	-	0.75/3 = 25%							
模擬 躯体		延長2.25	3.5			○							
		延長7.5	3.5			○							
本実験での最大探査深度								5.0m					

注1)*: 模擬躯体に隣接する模擬空洞 注2) 代表断面は、最も深い模擬空洞または模擬躯体を検出した測線の断面図である

(2) 二次評価

1) 評価対象手法の絞り込み

一次評価で模擬空洞を検出したと評価した 19 手法の探査結果を精査した。

一次評価で「検出した」と判定した地中レーダ探査 (No.12) での深度 5.0 m の模擬空洞及び模擬躯体の反応は、他の模擬空洞の検出状況などから、模擬空洞以外の異物や地盤条件への反応である可能性が高いと判断し、以降の評価では「検出しなかった」と判定を見直した。同様に、地中レーダ探査 (No.16) での深度 3.5 m・5.0 m の模擬空洞及び模擬躯体の反応も「検出しなかった」と判定した。

また、電気探査 (No.1) 及び表面波探査 (No.18) は、水平的中率 (表 - 2) がそれぞれ 19 %、33 % と低く、模擬空洞以外の地盤条件等に対する反応である可能性が高い。模擬空洞への反応が明確でない理由として、これら手法では、測線を試験ヤードの盛土構造外まで延長して測定を行っており、模擬空洞を探査するには不利な実験条件であったことが考えられる。特に表面波探査 (No.18) については、模擬空洞の材料である発泡スチロールの S 波速度

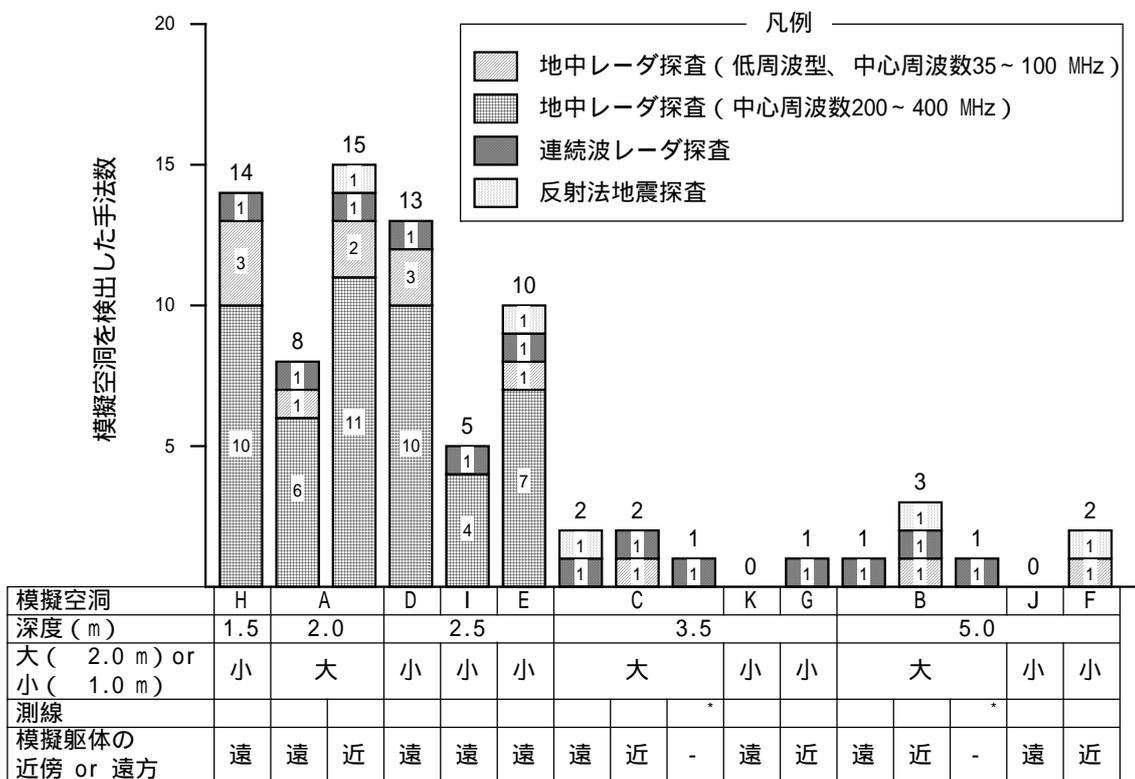
の範囲 (100 ~ 500 m/sec) が、土の範囲 (約 200 ~ 300 m/sec) と重なっており、適合性の低い実験条件であったと考えられる。そこで、これら 2 手法は本実験によって探査性能を評価することは困難と判断し、以降の評価の対象外とした。

なお、反射法地震探査 (No.19) は P 波を測定する手法であり、測線は試験ヤード外まで延長していた。また発泡スチロールの P 波速度 (700 m/sec) は、空気 (340 m/sec) と土 (1000 ~ 2000 m/sec) の中間であるため実験条件が不利であった可能性もあるが、探査結果は評価可能な範囲にあると判断した。

2) 二次評価の結果

絞り込み後の 17 手法について、各模擬空洞を検出した手法数の分布を図 - 11 に示す。なお上記 3.(2) で述べたとおり、模擬空洞及び測線の配置は模擬躯体の近傍 / 遠方を考慮したものであるため、図 - 11 は測線別の表示としている。

図 - 11 より、a) 深度が浅いほど検出数が多い、b) 空洞幅が大きいほど検出数が多い、c) 躯体に近い測線ほど検出数が多い、という傾向が見て取れる。



*) 測線 ・ は、模擬躯体を横断するため、近傍・遠方の分類をせず、「-」と表示した

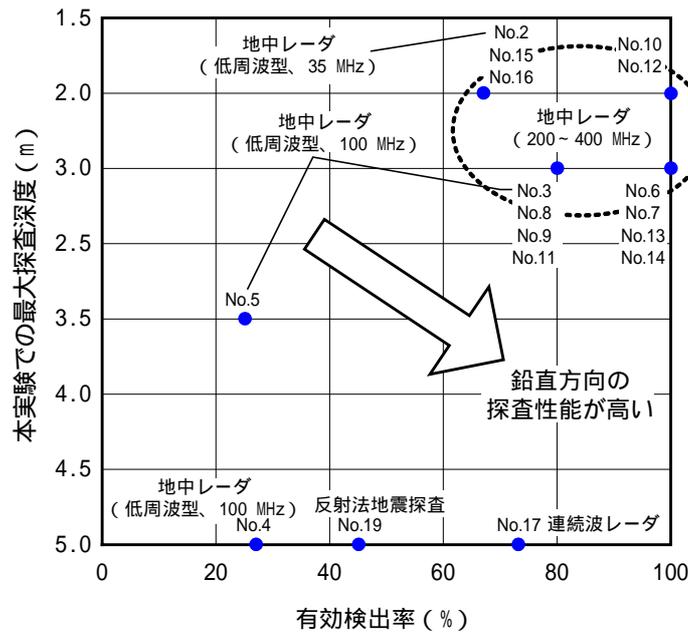
図 - 11 模擬空洞を検出した手法数の分布 (二次評価)

上記 a)・b) は常識的に予測された傾向と合致する。上記 c) については、「模擬躯体の近傍では、これが障害物となり模擬空洞を検出し難いはずである」という予測とは逆の傾向となった。この原因は明らかでないが、埋土の不均一性など模擬躯体以外の要因を反映したものと推察される。よって、模擬躯体の影響については、模擬躯体の近傍（離隔

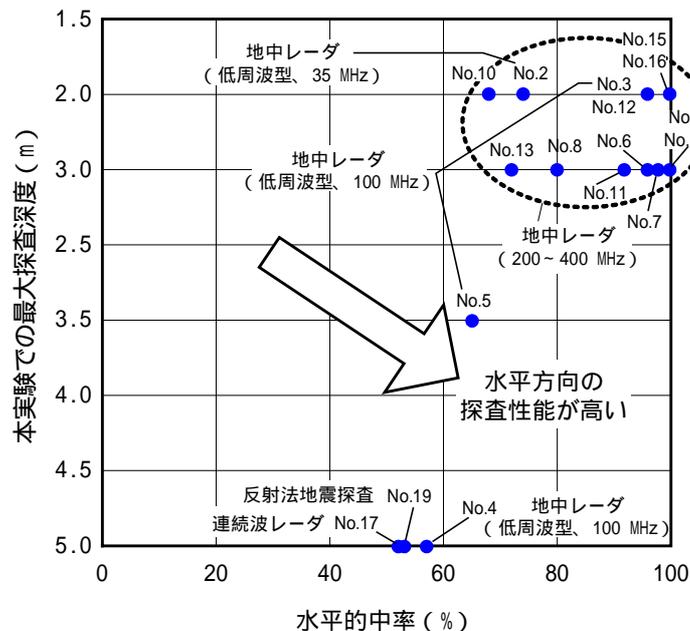
50 cm の測線 及び測線) においても模擬空洞を検出可能であることを確認できたが、検出し難さの程度は不明であった。

また、図 - 11 から、以下のことがわかる。

深度 5.0 m の模擬空洞を検出した探査法は、地中レーダ探査（低周波型）・連続波レーダ探査・反射法地震探査の 3 つである。



(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 - 12 深さ方向及び水平方向の探査性能

最も多くの模擬空洞を検出した手法は連続波レーダ探査であり、深度 3.5 m 以深の模擬空洞(小)に未検出があったが、深度 1.5~5.0 m の空洞を 1 手法で満遍なく検出している。

深度 5.0 m の模擬空洞(小)を検出したのは、地中レーダ探査(低周波型)・反射法地震探査の 2 つである。ただし、模擬躯体を検出できなかった深度が散在する。

地中レーダ探査(200~400 MHz)で深度 2.5 m 以浅に限定した場合、4 手法(模擬空洞 I、測線)~11 手法(模擬空洞 A、測線)が全般的に模擬空洞を検出した。しかし深度 3.5 m 以深では模擬空洞を検出していない。

本実験での最大探査深度と、有効検出率及び水平的中率の関係を図 - 12 に示す。グラフのプロットが右下であるほど、深さ方向(図 - 12(a))または水平方向(図 - 12(b))の探査性能が高いことを意味する。

図 - 12(a)では、連続波レーダ探査のプロットは最も右下(本実験での最大探査深度 5.0 m、有効検出率 73%)にあり、深さ方向の探査性能が高い。また地中レーダ探査(200~400 MHz)の多くのプロットは右側(有効検出率 80%以上)にあり、探査深度を 2.5 m 以浅に限定した場合は、深さ方向の探査性能が高いことになる。反射法地震探査のプロットは左側(有効検出率 45%)であり、地中レーダ探査(低周波型)は、手法による結果のバラツキが大きい。

図 - 12(b)では、明らかにプロットが右下にある、といえる手法はない。深度 5.0 m の模擬空洞を検出した地中レーダ探査(低周波型)・連続波レーダ探査・反射法地震探査の 3 手法は、いずれも水平的中率(平均)が 50%程度、つまり、推定した空洞位置(延長)の直下に模擬空洞がある確率が 50%程度である。地中レーダ探査(200~400 MHz)は多くのプロットが右側(水平的中率 80%以上)にあり、深さ方向と同様に、探査深度を 2.5 m 以浅に限定した場合は、水平方向の探査性能が高い。地中レーダ探査(低周波型)は、手法による結果のバラツキが

大きい。

(3) 総合評価

今回実験を実施した 32 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、「より深い空洞を、より高精度で検出できるほど探査性能が高い」という観点で、次のように総合評価した。

連続波レーダ探査(1 手法実施)

深度 1.5~5.0 m の模擬空洞を最も満遍なく検出し、深さ方向の探査精度が高かった。水平方向の探査精度は、地中レーダ探査(200~400 MHz)の高精度な手法と比較して低い。

したがって、地中レーダ探査(200~400 MHz)などの探査可能深度よりも深い位置の探査に有効と考えられる。

地中レーダ探査(200~400 MHz)(14 手法実施)

深度 1.5~2.5 m に限定した場合、深さ方向・水平方向ともに、連続波レーダ探査よりも模擬空洞の検出精度が高い手法が多い。一方、模擬空洞を 1 個も検出できなかった手法もあった。

したがって、浅層部に近い深度を探査する場合、機器仕様、測定方法、解析方法、探査実施者や解析者の熟練度などによっては有効な探査が可能と考えられる。

地中レーダ探査(低周波型、35~100 MHz)(5 手法実施)

現状で地中レーダ探査(200~400 MHz)よりも普及度が低い探査法である。一部の手法(100 MHz)で深度 3.5 m・5.0 m の模擬空洞を検出したが、探査可能深度や検出精度にはバラツキが大きかった。

反射法地震探査(1 手法実施)

路面下空洞探査法としては開発段階にある。深度 5.0 m の模擬空洞(小)を検出し、水平方向の検出精度は連続波レーダ探査と同程度であったが、深さ方向の検出精度は高くなかった。

電磁探査(5 手法実施)

模擬空洞を検出できなかった。

電気探査・表面波探査・磁気探査(それぞれ 3 手法・1 手法・1 手法実施)

実験条件や評価方法を考慮し、今回は評価対象外とした。

4. おわりに

路面下深層部に模擬空洞（深度 1.5 m～5.0 m）及び模擬躯体（土被り 3.5 m）を埋設した屋外試験ヤードで、募集・選定された参加者によるブラインドテストを実施した。13 社・32 手法による実験結果に基づき探査法の性能を評価した。

深層部空洞の探査技術に関する次の課題として、各探査法について現道での探査性能を検証することが挙げられる。

最後に、本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の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 財団法人 道路保全技術センター（2008）：リーフレット「路面下空洞探査」、2008.5