

レーダーを用いた海岸堤防の空洞探査事例

佐伯公康*・佐藤伸哉**・藤田士郎***・坪田幸雄*

Case of Cavity Detection at Coastal Embankment Using Radar

Kimiyasu SAEKI, Shinya SATO, Shirou FUJITA and Yukio TSUBOTA

Abstract: In order to grasp cavity formation phenomena due to the outflow of sand at coastal embankments where sand and gravel were packed in concrete, ground penetrating radar (GPR) measurement was carried out. The result of the radar measurement was analyzed, and compared with outward appearance observation result. As a result, at places where appearance change was not remarkable, the possibility of cavity was discovered by the radar measurement. This cause was discussed based on the mechanism of hollowing progress.

Keywords: Coastal embankment, Ground penetrating radar, Deterioration, Cavity formation phenomena

1. 緒 言

海岸保全施設は、海洋に囲まれた我が国において国土を保全し国民生活の安全を維持する上で重要な社会資本である。しかし従来、十分な維持管理方策がとられておらず、築造後長期間を経た施設の劣化変状が目立ってきた。そのため施設の供用期間全体を対象とした管理システムを構築し、適切な方法で点検し、客観的な指標で老朽度を判定し、補修や改良を適切な順位づけのもとに実施することが必要となっている。

特に、コンクリート等で被覆された傾斜型堤防（いわゆる三面張り堤防）における、内部砂が波の作用によって吸い出される空洞化現象は、破堤につながる現象であり、適切に空洞の規模を判定し、必要な補修を行う必要がある。

本稿では、モデル地区においてこうした空洞の存在を地下レーダー探査により推定した事例を述べる。レーダー探査と外観上の変状を照合し、その結果を空洞化の進行メカニズムを踏まえて分析する。また他の探査事例も参考に、レーダー探査の有効性とその位置づけについて考察する。

2. 海岸保全施設の点検・維持管理

我が国の海岸保全施設は1960年前後の伊勢湾台風とチリ地

震津波を契機に急速に整備が行われた。近年、それらの施設が築造後40年近く経過して劣化変状が目立ってきている。こうした施設の老朽度を、体系的な点検手法に基づいて客観的に評価し、維持補修を効率的に行っていくことが必要となっている。

国土交通省港湾局により海岸保全施設の体系的な点検手法の案が示されており、点検を次のような種別に分けている。¹⁾

初期点検 維持管理のスタートポイントとなる点検。

一次点検 外観に現れる変状現象を目視あるいは簡易な点検機器により点検。

日常点検 変状、劣化の早期発見を行うための、日常的な巡回目視。

定期点検 維持管理計画に基づいた定期的点検。日常点検ではチェックが困難な部位も点検する。

臨時点検（含む異常時点検） 荒天、地震等の直後の点検。構造物及び付帯施設に異常が生じていないかを巡回目視。

二次点検 一次点検では点検できない場合、あるいは変状の程度・原因を把握できない場合の、特別な機器を用いた点検。

海岸保全施設は延長が長いため、点検作業の費用と労力が大きくなりやすい。そのため合理的な点検システムと、実用

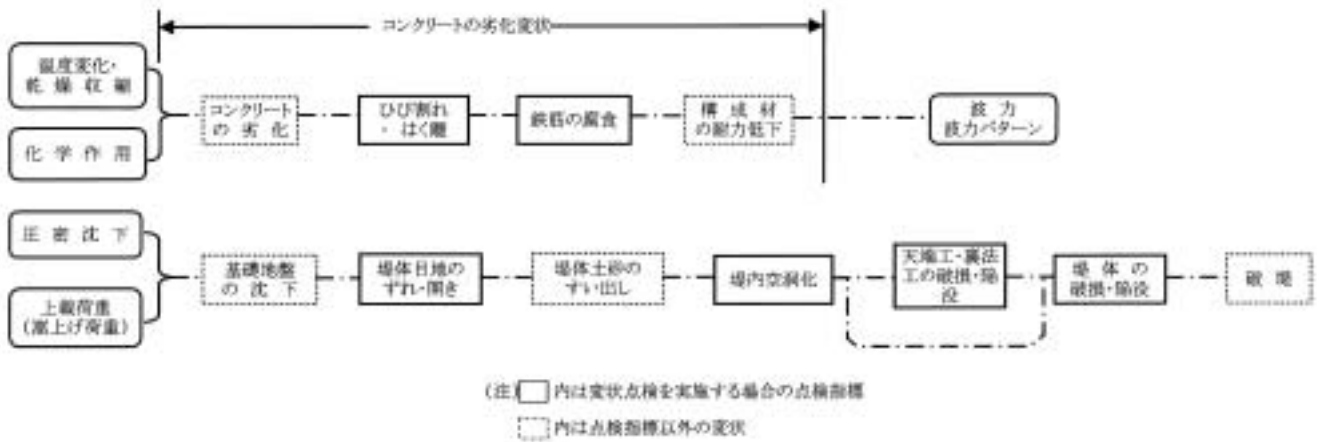


図1 護岸・堤防の進行型変状連鎖

的な点検技術が必要となる。

3. 三面張り堤防の空洞化現象

1960年頃に全国各地の海岸で整備された、盛土の三面をコンクリート等で被覆した傾斜型堤防（以下、三面張り堤防）は、長年にわたっての波浪により内部の砂が吸い出され、空洞化することが報告されている。この現象は、地震時や激浪時の堤防の安定性を低下させると推測される。

堤防の変状の進行には、一般的なパターンがあるとされ変状連鎖と呼ばれている。図1に変状連鎖図を示す。²⁾図中の下半分が空洞化の進行を示している。築堤後、堤防の重みで地盤が沈下すると堤防の目地部にずれや開きが生じ、その部分から水が侵入し内部砂の吸い出しを生じて堤防内に空洞が発達し、天端工の破損・陥没、ひいては堤防の破損・陥没に至るとされている。

クラックの形状や海側法尻からの砂の流出をもとに、外観目視でもある程度空洞の存在が推測できるが、明確な判断は出来ない。また削孔による内部調査は確実性はあるが相応の費用と時間を要する。そこで、こうした手法以外に、レーダー探査等の非破壊検査を適切に実施することが有効と考えられる。

4. 地下レーダー探査の原理と特徴

地下レーダー探査は、地中電磁波の反射・透過現象を利用する計測法である。³⁾地下に向けて電磁波を放射すると、地層境界・埋設物・空洞など電気的性質の異なる部分で反射・屈折する。この原理を利用し、地下へ電磁波を放射し地上に戻ったエネルギーの一部を捉えることによって、地下の構造を知ろうとするものである。その模式図を図2に示す。

地下レーダー探査の優位点と問題点は次の通りである。

【優位点】

- ・構造物を破壊することなく探査が行える。
- ・探査に必要な機材が少なく、持ち運びに優れる。
- ・時速2.0～3.0km程度で探査が実施でき測線の占有時間が

短い。

- ・様々な探査目的、探査目標深度や測線状況（平地か斜面か、平面か壁面かなど）に対し、電磁波の周波数を変えることで適応できる。一般的には、探査深度が浅いものほど高周波数の電磁波を用いて高い解像度の画像を得られるようにし、深いものほど低周波数の電磁波を用いてより深い深度まで電磁波を浸透させて計測する。

【問題点】

- ・コンクリートや空洞などの「厚み」については、それら媒質の電磁波速度の一般的な値を用いて換算するため誤差が生じやすい。
- ・反射強度差の大きい箇所を空洞と判断するが、金属など比誘電率の小さな埋設物があった場合同様の反射波形となり区別がつきにくく、間違った判断をする可能性がある。
- ・水が存在すると結果に影響し、一般に探査範囲が狭く（浅く）なる。
- ・データの解釈にはある程度技術者の経験が必要である。

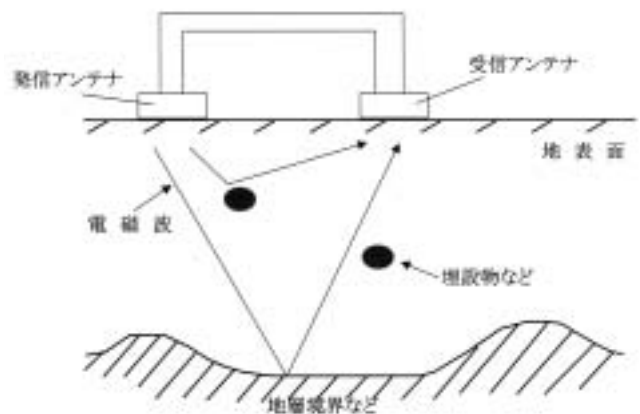


図2 地下レーダー探査の模式図

近年、地層構造の把握、埋設管の探査などへのレーダー探査の適用事例が増えてきている。例えば既設トンネルにおいて、内部から覆工巻き厚の確認と覆工背面の空洞の発見のために行った例⁴⁾がある。その際コア抜き調査も同時に実施して精度を上げている。また下水管路周辺の空洞調査システムも提案されている。⁵⁾これは管内を自走するレーダー探査機を用いて、管路の壁外に生じた空洞を発見する方法であり、得られたデータから空洞を自動抽出するソフトウェアも導入されている。

こうした事例の増加とともに、データの解釈を行う際の知見が蓄積されてきている。

5. 海岸堤防におけるレーダー探査の実施

5.1 探査の目的

レーダー探査は、三面張り堤防内の空洞の発見において有効性が期待できる。そこでモデル地区において実際に空洞探査を実施して、得られたデータを外観上の変状や空洞化メカニズムと関連づけて分析し、手法の有効性を検討することとした。

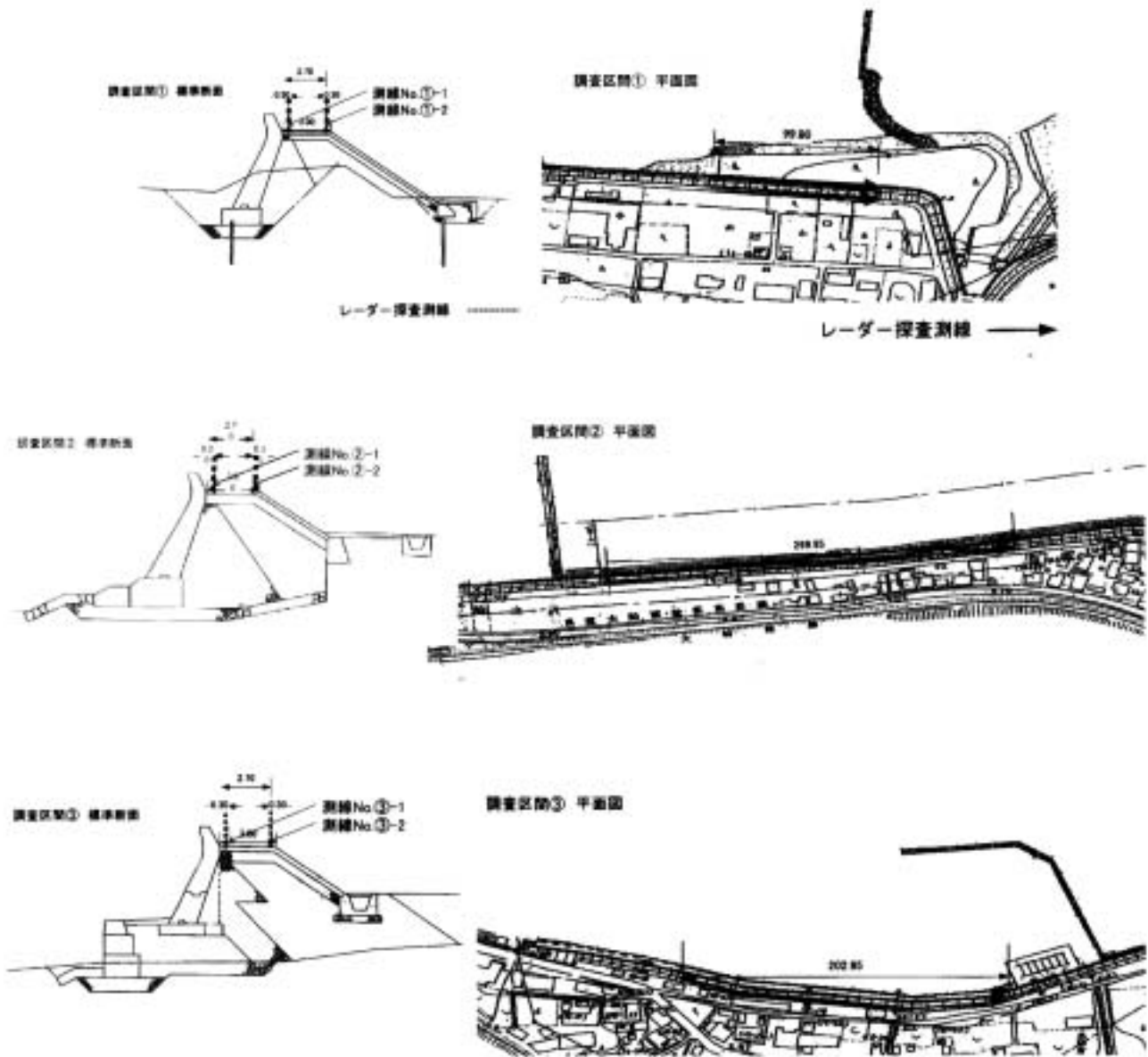


図3 測線配置図

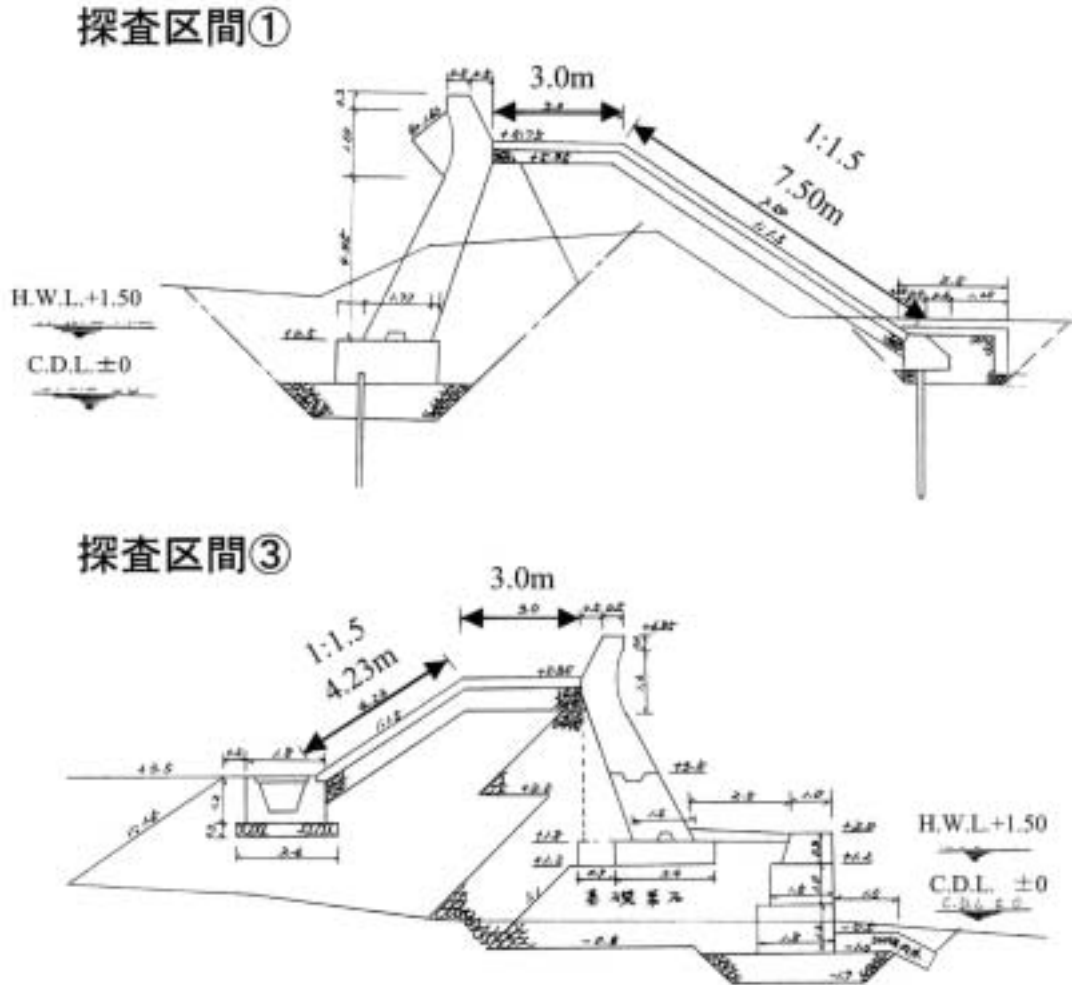


図4 調査対象施設の標準断面図

5.2 調査対象施設の概要

調査対象施設は、脇之沢漁港海岸（岩手県陸前高田市）の、昭和30年代に建造された無筋コンクリート三面張り堤防3区間である。調査は2002年3月に実施した。

図3に示すように、堤防3区間の水叩き（本体天端面）上に、法線方向に2本（パラペット寄りと裏のり肩）の測線を設定し、この測線上で調査を行った。図中、区間の測線長は99.80m（10スパン）、区間は269.95m（27スパン）、区間は202.95m（19スパン）である。（法線方向10m程度ごとにコンクリートの目地が設けられており、その各区間をスパンと称す）また両測線の間隔は2.40mとした。（区間の一部では障害物を避けるため1.40mとした）

図4に対象施設の標準断面を示す。

5.3 モデル地区の施設外観

今回のレーダー探査と同時に、対象施設の外観の観察と記録を行った。外観写真を図5に示す。また目視観察による変状の記録を図6に示す。

図6より、各区間の水叩き面を見ると、区間では、パラペットと比較して相対的に数cm沈下していた。しかし面上に大きな凹凸はなく、ひび割れも少なかった。

区間の水叩き面は、パラペットとの間の相対沈下量が全般に約10cmであった。またスパン境界の目地に数cmの段差が見られた。一部、水叩き面が波打つように沈下している状況が見られた。

区間の水叩き面は、法線直角方向のひび割れが顕著であった。沈下はパラペット寄りと裏のり肩の双方で生じており、相対沈下量は最大13cmであった。沈下が顕著な区間中に、沈下の少ない部位が存在し、水叩き面が波打つようになっている状況が多く見られた。この原因は7.3で考察する。

総括すると、外観上の変状の程度は区間で大きく、区間がそれに次ぎ、区間は最も小さかった。

なお表のり面は、樹木に覆われていたり海に面して目視が困難な区間が多く、今回は観察を行わなかった。



図5 探査区間の外観写真

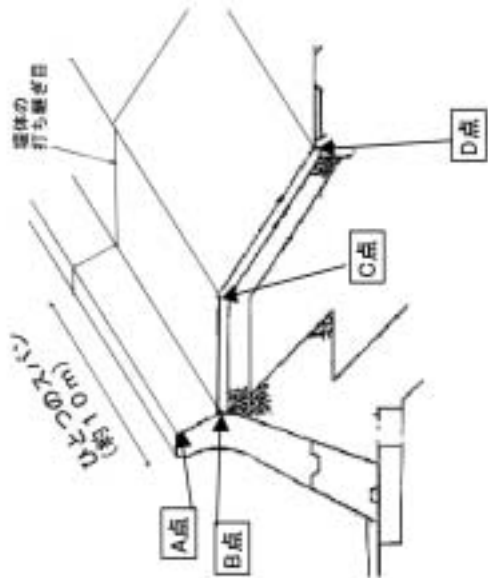
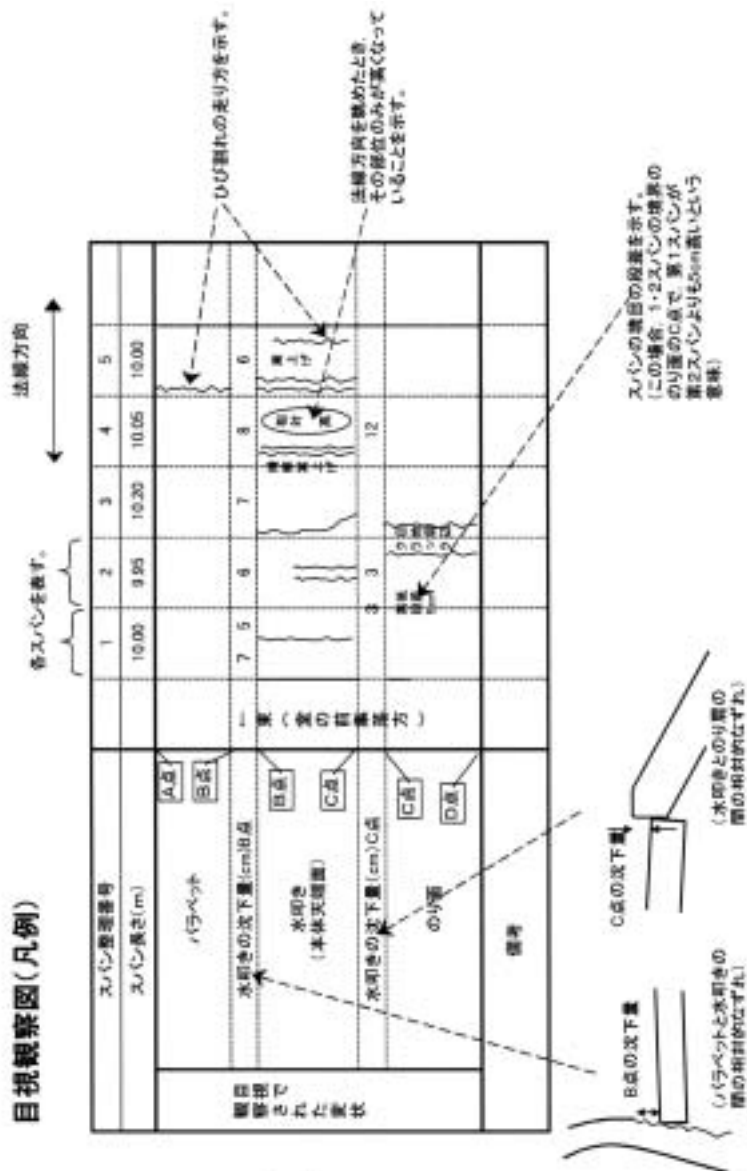


図6 目視観察による変状記録(4枚中の1)

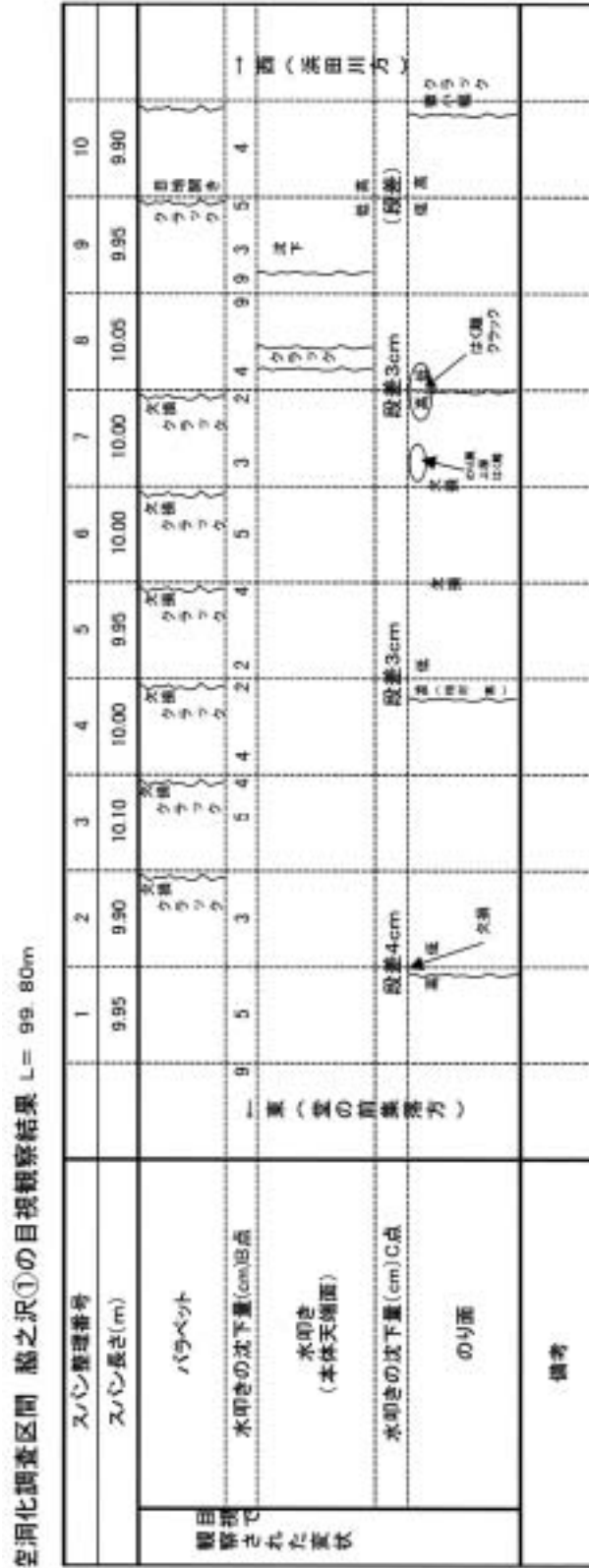


図6 目視観察による変状記録(4枚中の2)

空洞化調査区間 越之沢②の目視観察結果 天端幅は3.05m(実測) L=269.95m

スパン整理番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
スパン長さ(m)	10.05	9.90	9.85	9.85	10.10	9.90	9.95	10.05	10.05	10.05	10.05	10.05
パラベット												
水印きの沈下量(cm)B点	5	12	11	6	8	10	7	9	0	0	0	7
水印き (本体天端面)	7cm			3cm	はくひ		6cm			コンクリート剥離		
水印きの沈下量(cm)C点	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
のり面	0cm	0cm					6cm					
備考		のり剥離										

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
10.00	9.95	10.00	10.10	9.95	9.00	10.05	10.00	10.05	9.95	10.00	9.90	10.05	10.10
8	7	7	6	7	7	10	5	8	8	7	7	10	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
のり剥離													
表面欠損													

図6 目視観察による変状記録(4枚中の3)

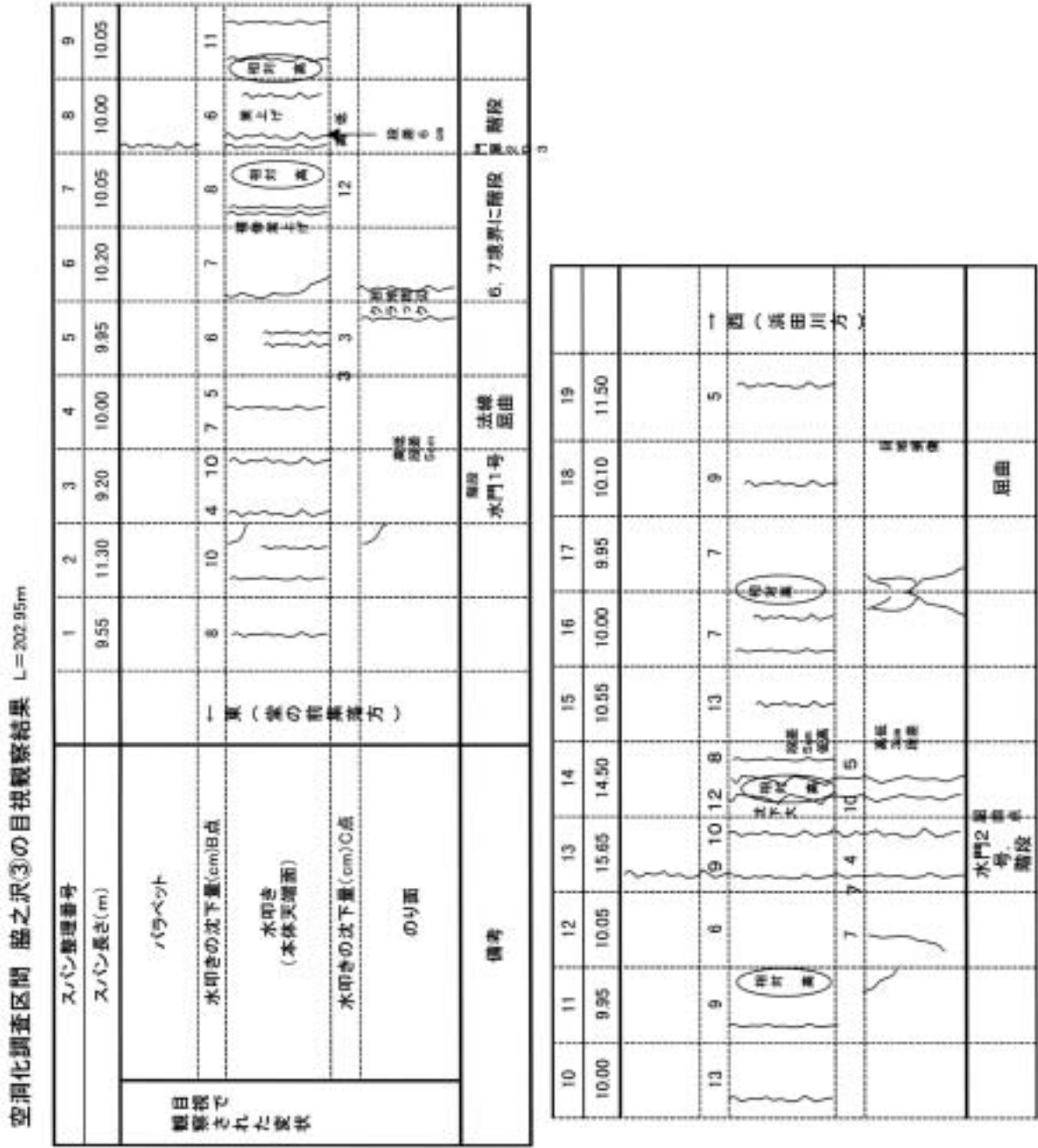


図6 目視観察による変状記録（4枚中の4）

6. 探査機器の概要とデータ処理方法

6.1 機器の構成

今回の脇之沢漁港海岸におけるレーダー探査では、スウェーデンのMala GeoScience（マロ・ジオサイエンス）社製のRAMAC/GPRを使用した。その基本的な構造は一般的なシート型のポウタイアンテナ（平板型アンテナ）であるが、小型・軽量で携帯性に優れている。装置はコントロールユニット、発信・受信アンテナ、ノートパソコンの3個のユニットから構成されている。機材一式を図7に示す。各ユニットは直流式バッテリーで駆動し、光ファイバーケーブルで接続されている。

コントロールユニットでは電磁波の発信、受信を制御するとともに、測距輪の回転データをもとに距離測定を行う。

発信・受信アンテナは一つのボックスに共に収められていて、ボックスには測距輪が付いている。

ノートパソコンは、コントロールユニットから送られたデータをリアルタイムで表示し、記録する。



図7 探査機材一式



図8 探査状況写真

6.2 探査方法

探査は、コントロールユニットを背負い、アンテナボックスを引っ張って測線上を緩速（2～3 km/時）で歩行して行う。探査状況写真を図8に示す。

6.3 データの処理方法

(1) レーダーチャート

得られたデータは、移動距離を横軸に、時間を縦軸にして反射波の強度を濃淡で表した、縞模様のレーダーチャートとしてまとめられる。反射波が返ってくるまでの時間に、媒質に依存する電磁波速度を乗じたものが深度となる。

媒質中の電磁波速度は、比誘電率との間に次式の関係有す。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

ここに、 v ：媒質中の電磁波速度

c ：真空中の光速（ $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）

ϵ_r ：媒質の比誘電率

μ_r ：媒質の比透磁率

ここで比透磁率は媒質の透磁率と真空中の透磁率の比であるが、通常の地球構成物質の場合はほぼ1である。

比誘電率は媒質の種類に依存する。なお水および水を含む地層構成媒質においては、電磁波周波数が1 GHzより高い領域で比誘電率の周波数依存性が顕著になる。

表1に、代表的な媒質中の電磁波速度を示す。

(2) データの補正

得られたデータは空中・地下の直接波、地下の境界面からの反射波、埋設物による回折波などの影響を含んでおり、そのままでは解釈に適さないため、フィルターを用いて不必要な成分を除去するなどの処理が必要になる。

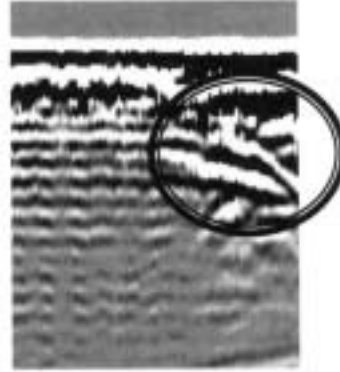
表1 諸媒質の電磁波速度

媒質	電磁波速度 ($\text{m}/\mu\text{s}$)
空気	300
水	33
石灰岩	75～223
花崗岩	223～234
コンクリート	66～150
粘土	74～150
シルト	63～100
砂	55～150

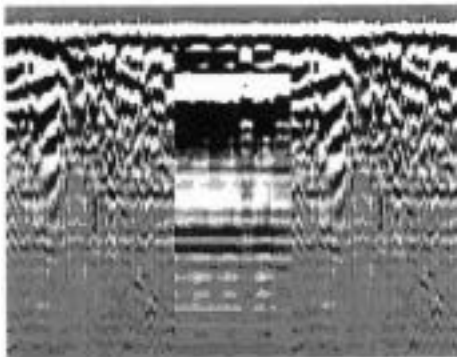
MGS社内資料による



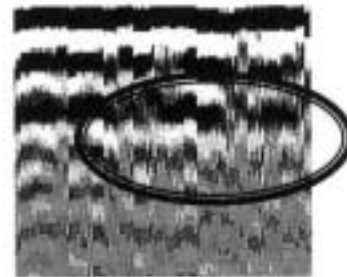
地中の埋設物
 反射波波形が、放射線状の波形をなす。
 下水管などの地下埋設物はこのような波形を示す場合が多い。この図においては大小2つの埋設管が確認できる



地中の地割れ(亀裂)
 反射波波形の第2層目が、図中央部付近から右側に沈み込んでいく様子を示す。
 亀裂や地質構造などはこのような波形を示す場合が多い。



地中の空洞(暗渠)
 正の反射波(白い部分)が図中央部に見ることができる。
 他の部分と比較し、反射強度が著しく異なっている場合は明瞭に画像化される。
 主に、ボックス型の暗渠などにこのような波形が見られる。



トンネル背面・路盤下部の空洞
 図の右側では反射波が細かく凸凹状となっている。これは、比誘電率の小さいものと大きいものが存在していることを示しており、一般にトンネル背面にたまった堆積物または空洞と判断する場合が多い。このように、一般に地山の場合には暗渠のような明瞭な空洞として反射波が捉えにくく空洞の判定を行うことは非常に難しい。また、道路下部の空洞などの場合には、地中の空洞以外のもの(小さな下水管など)が本例のような反射波を示す(異常信号)場合があり判断が非常に難しい。

図9 レーダー波形の解釈に関する一般的な知見

(3) データの解釈

レーダーチャートの解釈に関する一般的な知見を図9に示す。

一般に、細い縞模様が密な場合は地質構造の境界とみなし、太い縞模様がまばらにあるのは緩んだ部分とみなすことができる。(しかし、相対的な指標であり曖昧である。)また埋設物などは、上に凸の放物線状の曲線を描くことが多い。

7. 探査結果とその解釈

7.1 探査の実施

今回、計測範囲は深さ方向に1m程度と考え、電磁波周波数500MHzと250MHzの2種類のアンテナで探査を実施した。周波数と分解能力の関係については7.2に記す。

法線方向のサンプリング間隔は0.02mとした。取得データの精度向上のため、一度の探査で4回のサンプリングを行っ

てデータを平均化した。

当日は降雨は無く、水たまり等の障害も無かった。水叩き面の一部に草が生えていたが探査に特段影響は与えないと考えられる。探査の所要時間は正味5時間ほどであった。

7.2 レーダーチャートの作成

得られたデータからレーダーチャートを作成するに当たり、探査対象の表面が乾燥したコンクリートであること、また堤防内部の構造が礫と盛土で構成されていることから、電磁波の伝播速度を、表1を参考に $100.0\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定して深さ方向の分布に置き換えた。その場合、分解能力は、周波数500MHzでは深度方向0.05m、水平方向0.10mとなる。また周波数250MHzでは深度方向0.10m、水平方向0.20mとなる。

また、堤体内部の空洞の判別をし易くするため、得られたデータに対し利得(ゲイン)調整と、上下振幅の強調という2種類のフィルター処理を行った。フィルター処理後、500MHzアンテナで取得したデータでは1.00m程度、250MHzアンテナで取得したデータでは3.00m程度の深度まで解釈可能となった。図10に、ゲイン調整処理まで行ったレーダーチャートの例を示す。

両アンテナで得られたデータを比較したところ、分解能力の差が明確に現れ、250MHzの方は500MHzアンテナに比較して細かな構造の判読が難しかった。さらに、空洞は水叩き面のコンクリート直下に存在すると考えられ、深さ方向に数mもあるとは考え難いことから、空洞の判別には500MHzアンテナで取得したデータを用いることとした。

7.3 レーダーチャートの解釈

今回レーダーチャートを解釈するにあたっては、既往の知見と、外観上の観察記録を参考にした。構造物の内部状況とチャートの関連づけを図11に示す。

一般的なレーダーチャートの解釈に関する知見から、次のことが言える。

- ・空洞の反射波形は一般的に振幅の差が大きいことがあげられるので、水平多重反射波形を見つけ空洞と判断する。(例1)
- ・地表部に向かって凸型の双曲線波形を、堤防内の埋設物と判断する。(例2)
- ・水平に連続する反射波を、堤防内の構造境界と考える。(例3.1, 例3.2)

また探査対象箇所で行った外観の観察記録との照合から、次のことが言える。

- ・区間 では水叩き面の沈下が顕著だが、スパン境界付近に沈下せず相対的に抜け上がった状態の部分があり、水叩き面が波打つ状態になっていた。抜け上がっている箇所は、堤体内部を法線直角方向に区切る隔壁が埋設されていると予測できる。レーダーチャートを見ると、3スパン程度おきにレーダー波が減衰する箇所があり、壁のようなものが存在すると推察された。この減衰箇所は、抜け上がっている部分と一致した。以上より、減衰箇所は隔壁を意味していると考えてほぼ間違いない。このことから、沈下が顕著でない他区間でも隔壁の埋設位置を特定できる(例3.3)。
- ・その他の異常反射現象についても理由を明らかに出来る。(例4)

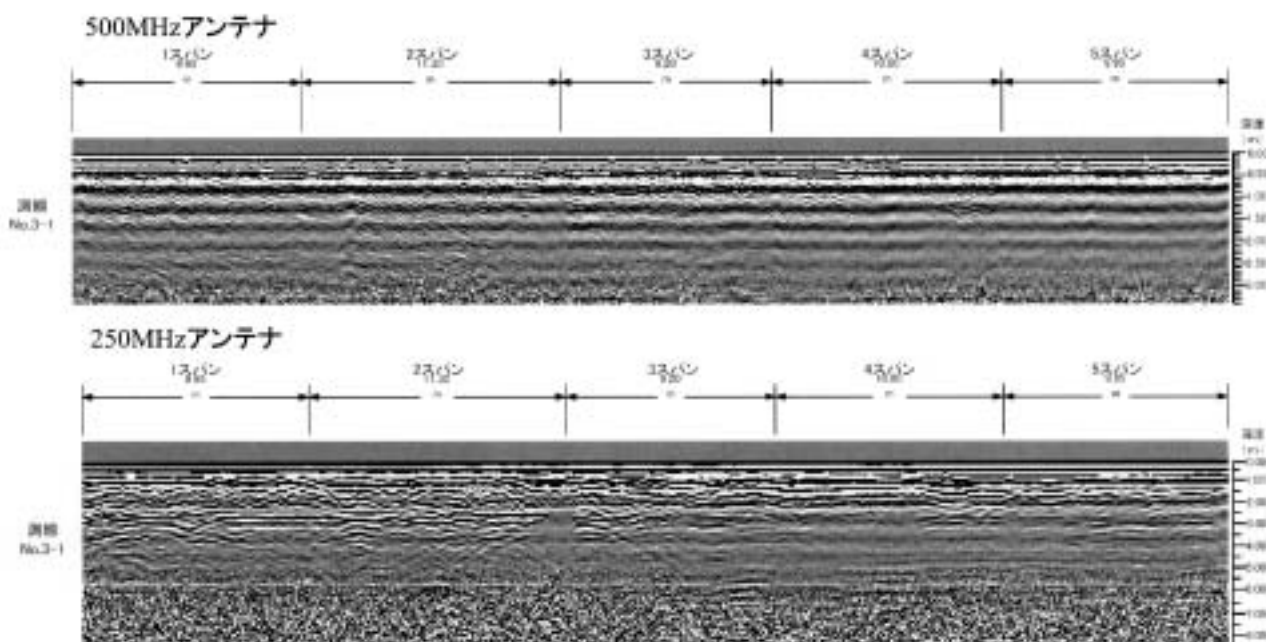


図10 レーダーチャートの例

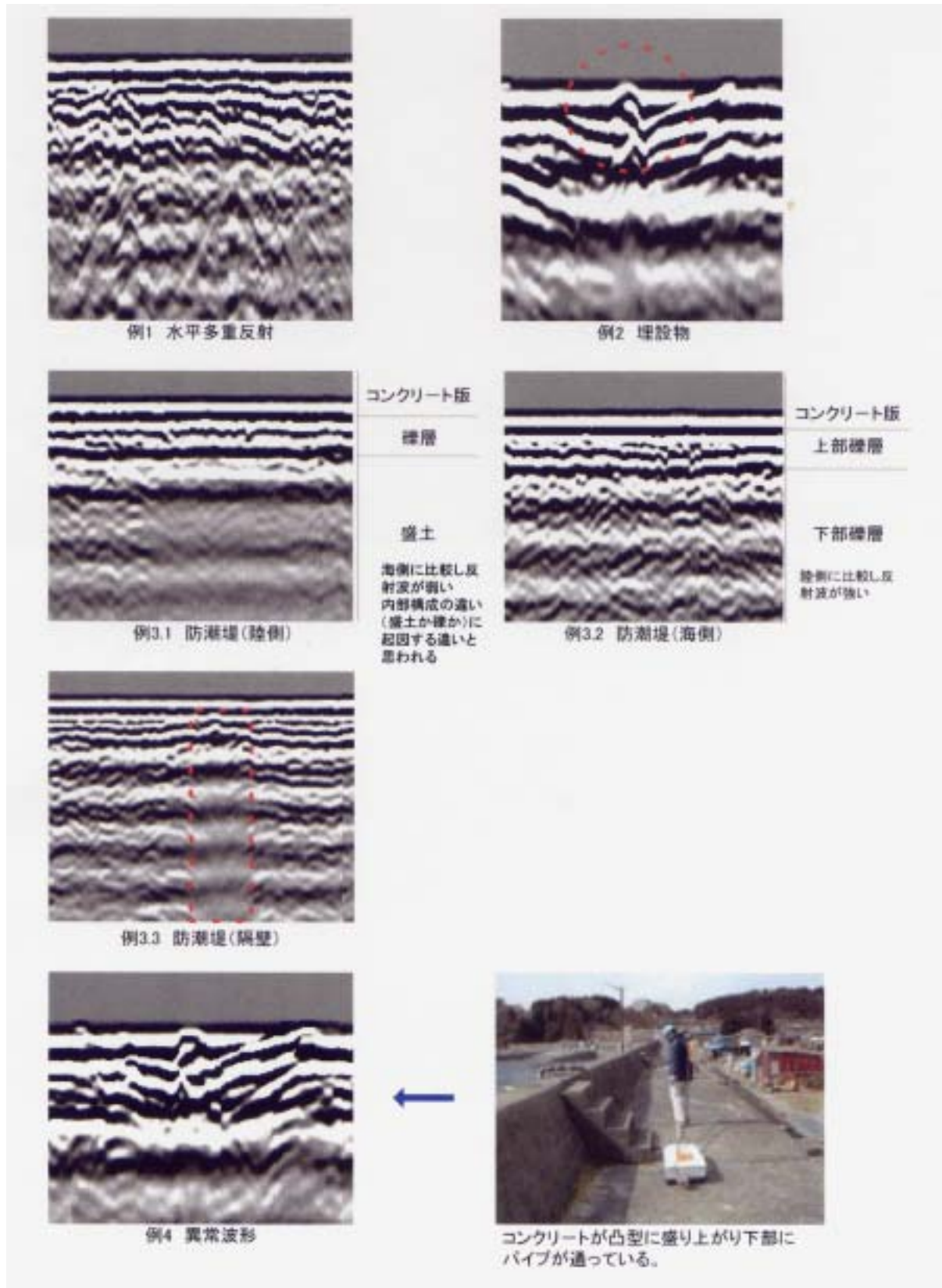


図11 探査対象箇所におけるレーダーチャートの解釈

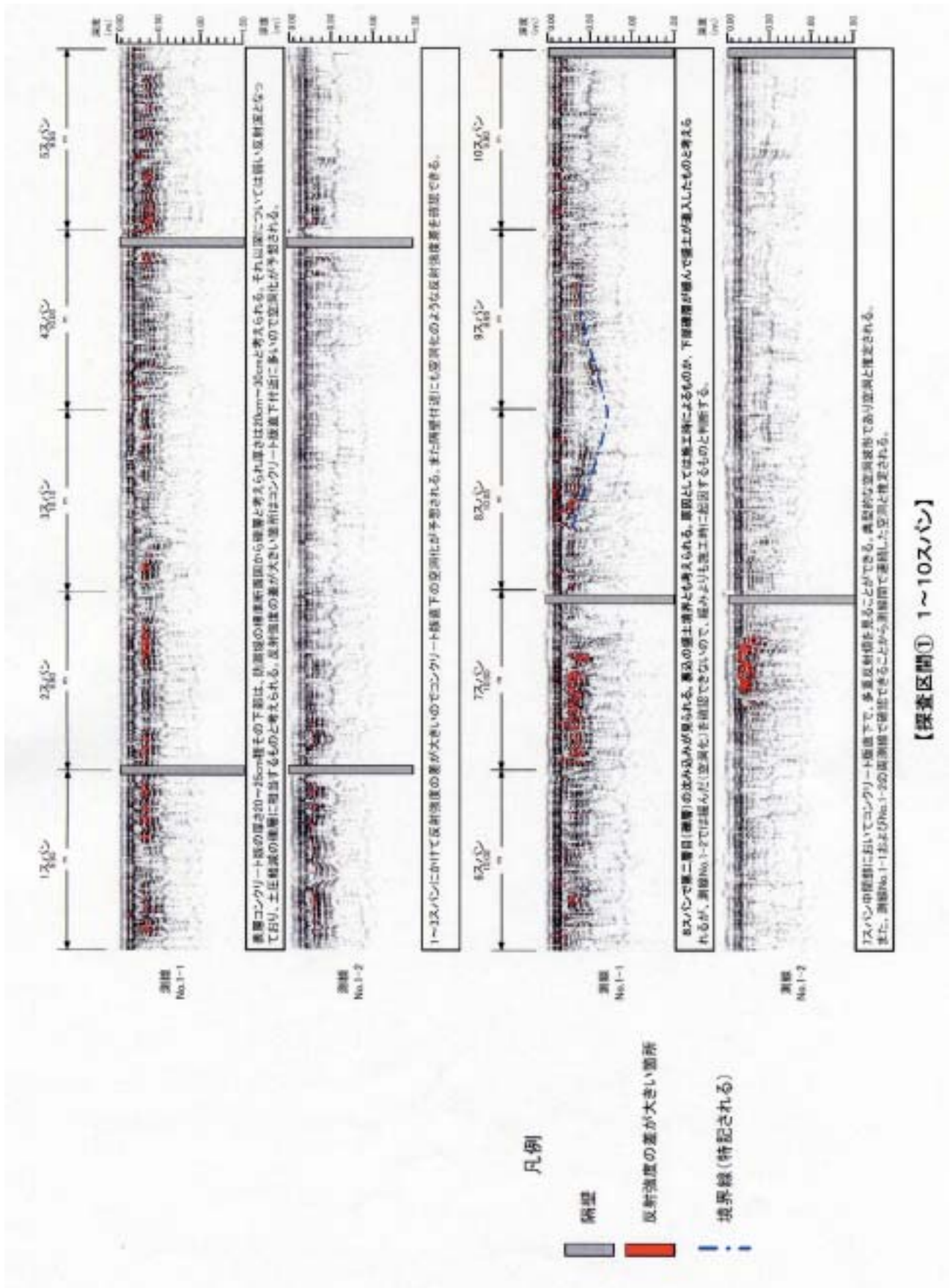


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定(6枚中の1)

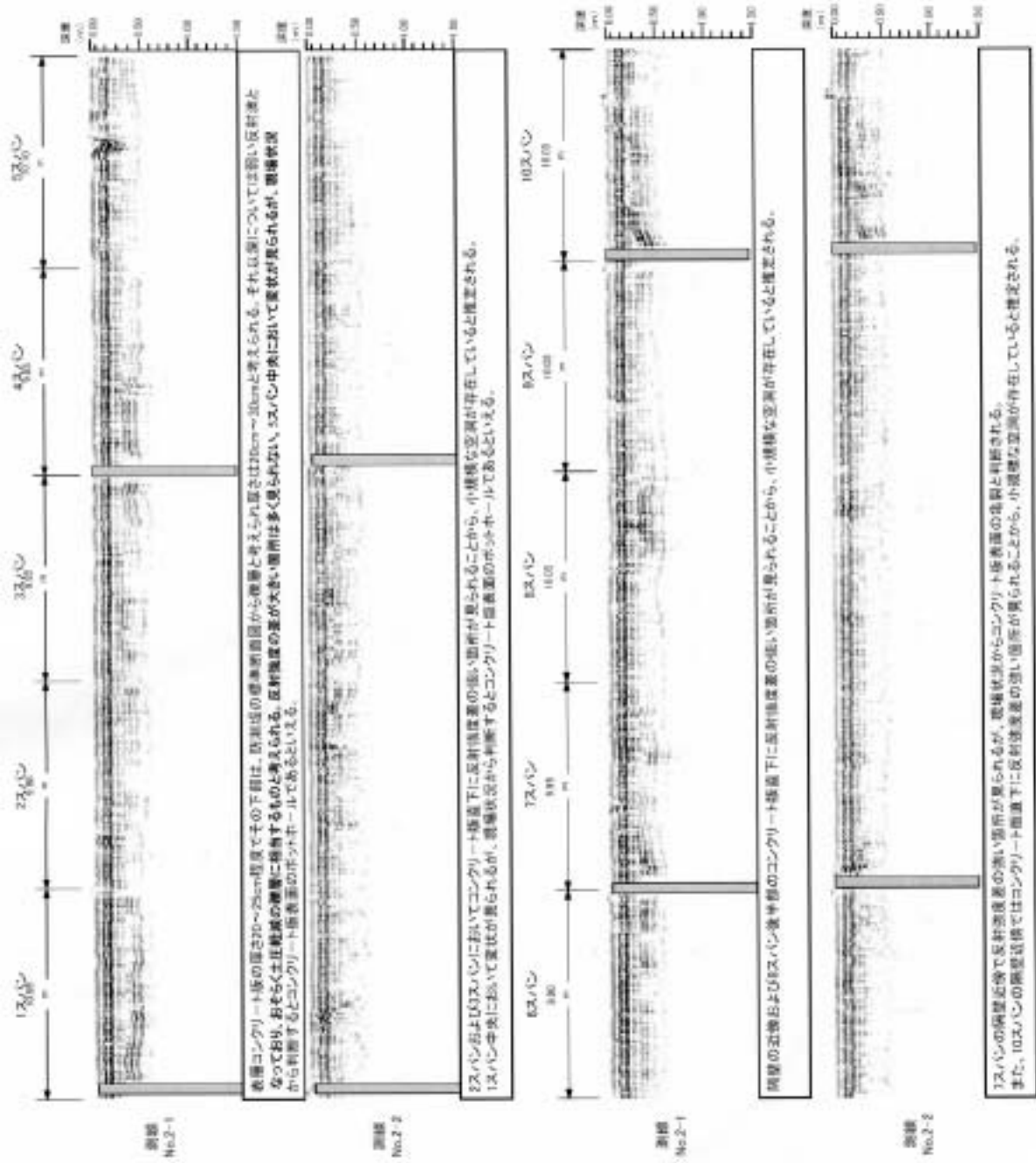


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定 (6枚中の2)

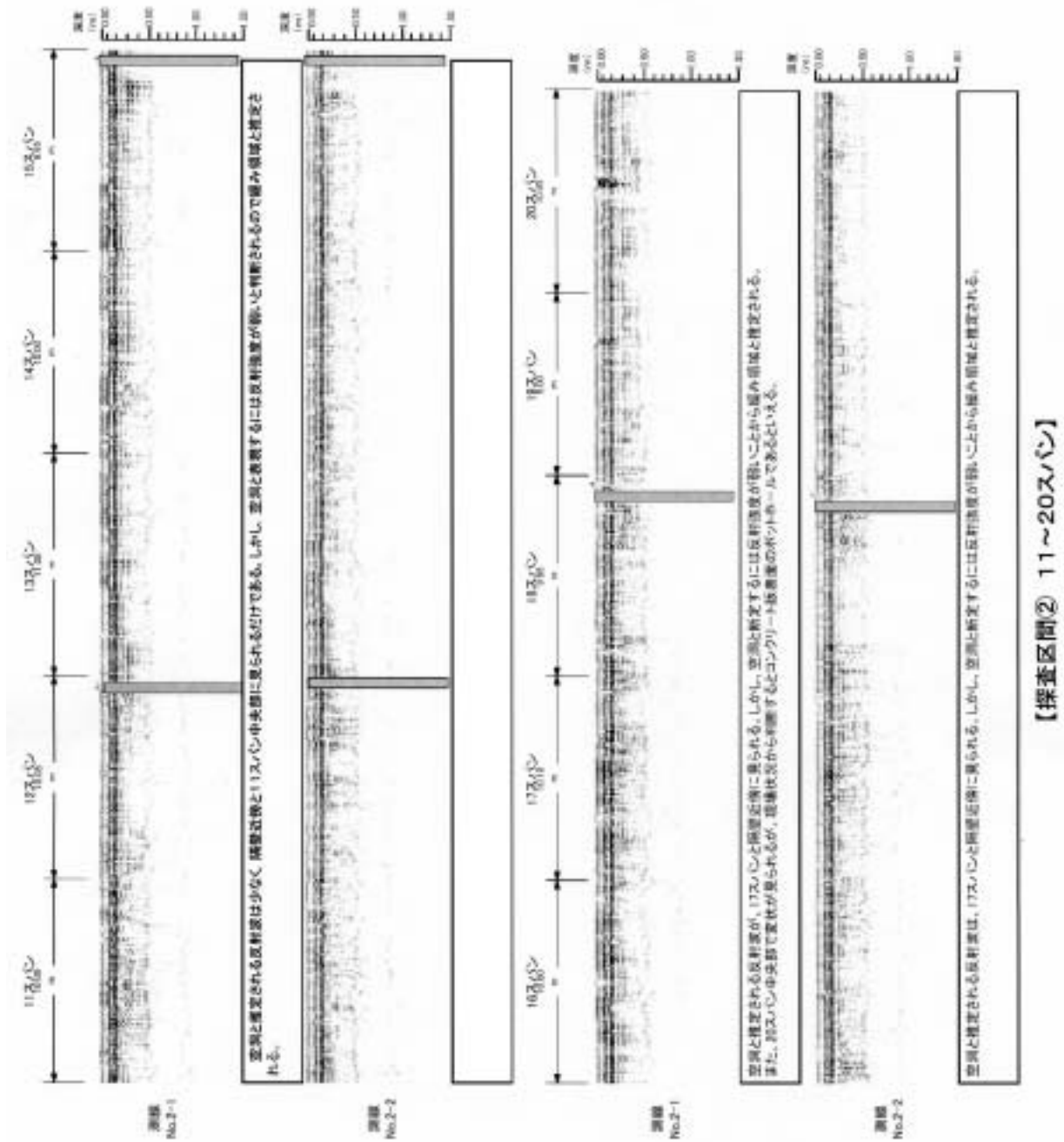


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定 (6枚中の3)

【調査区間② 11~20スパン】

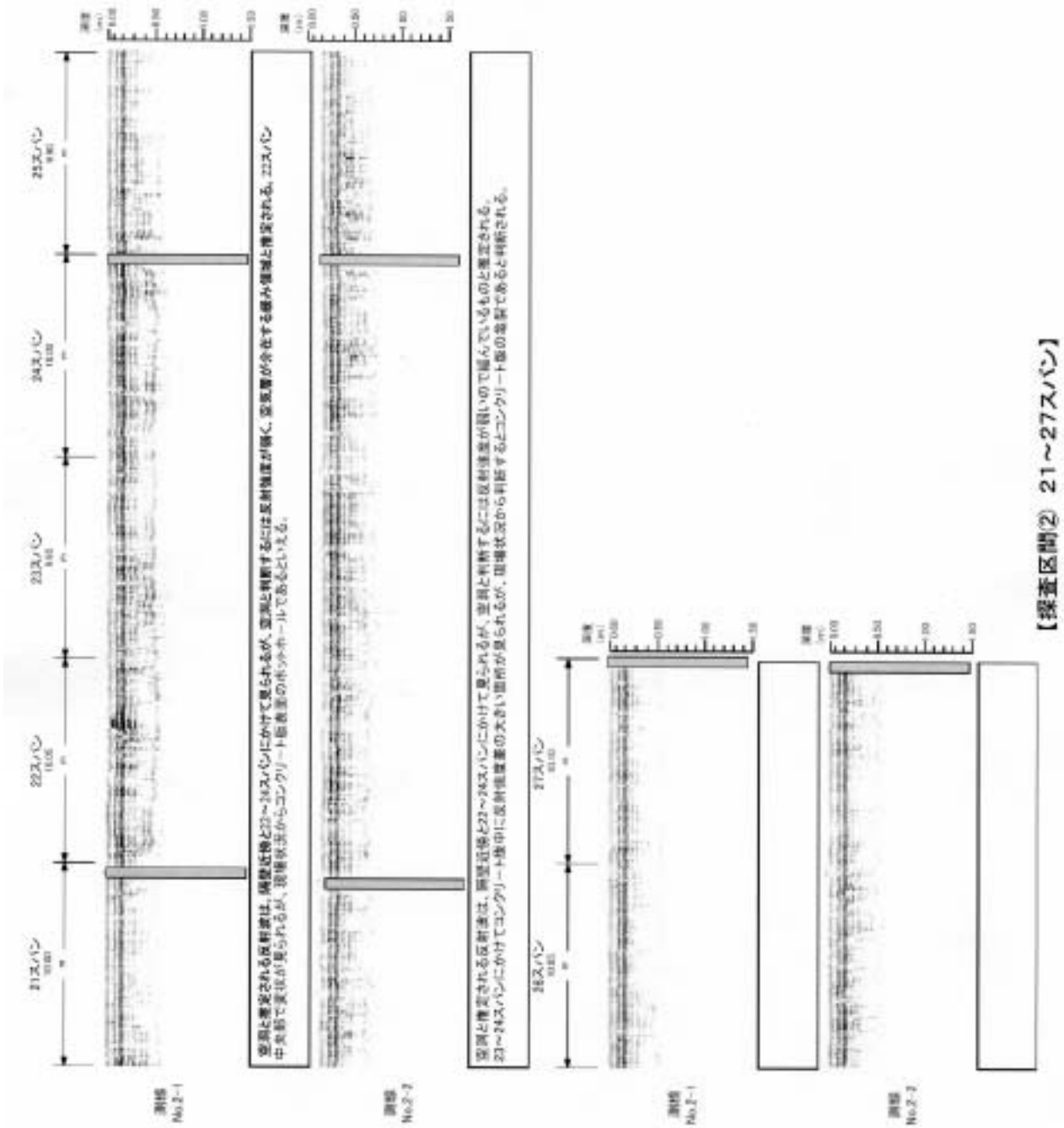


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定 (6枚中の4)

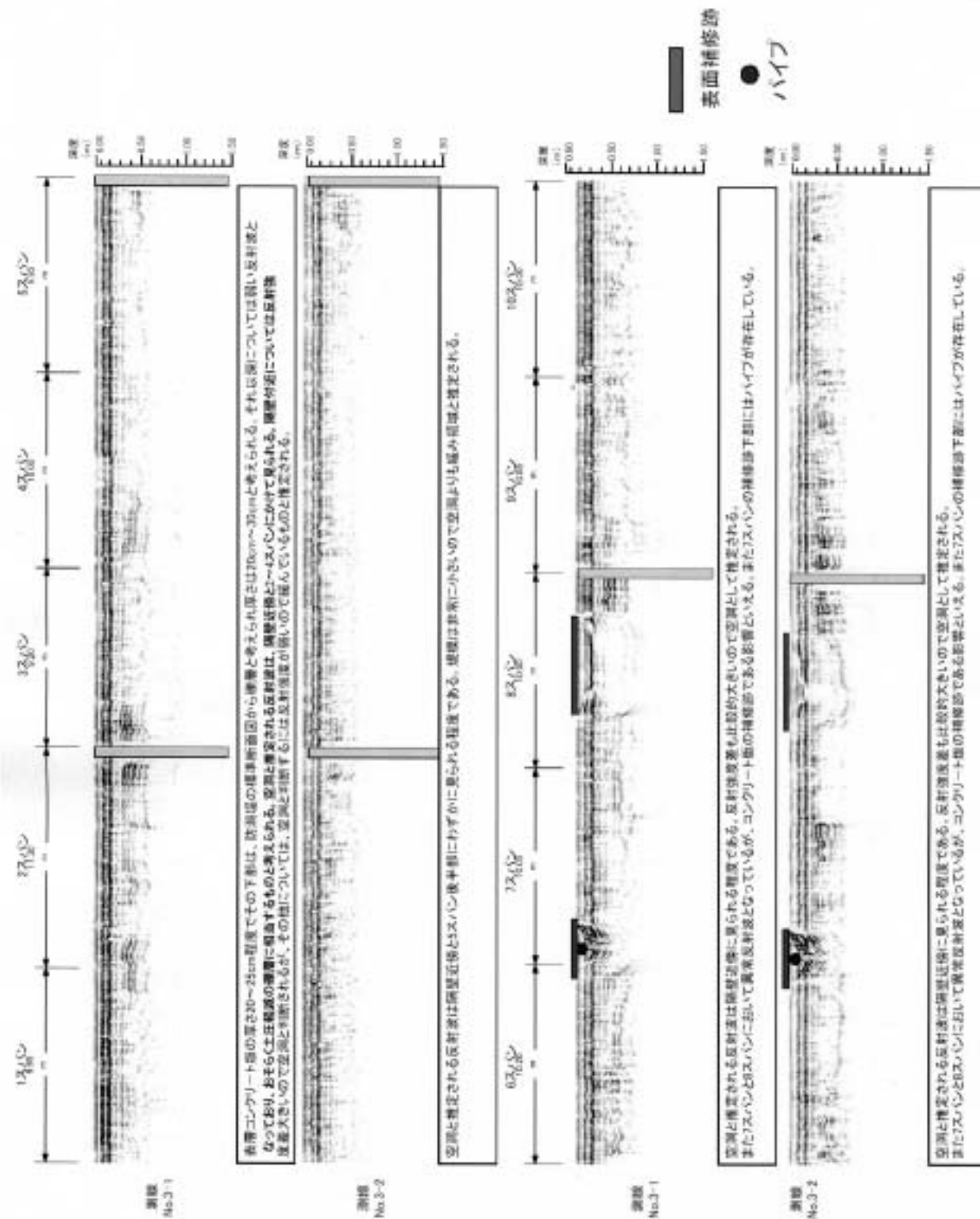


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定 (6枚中の5)

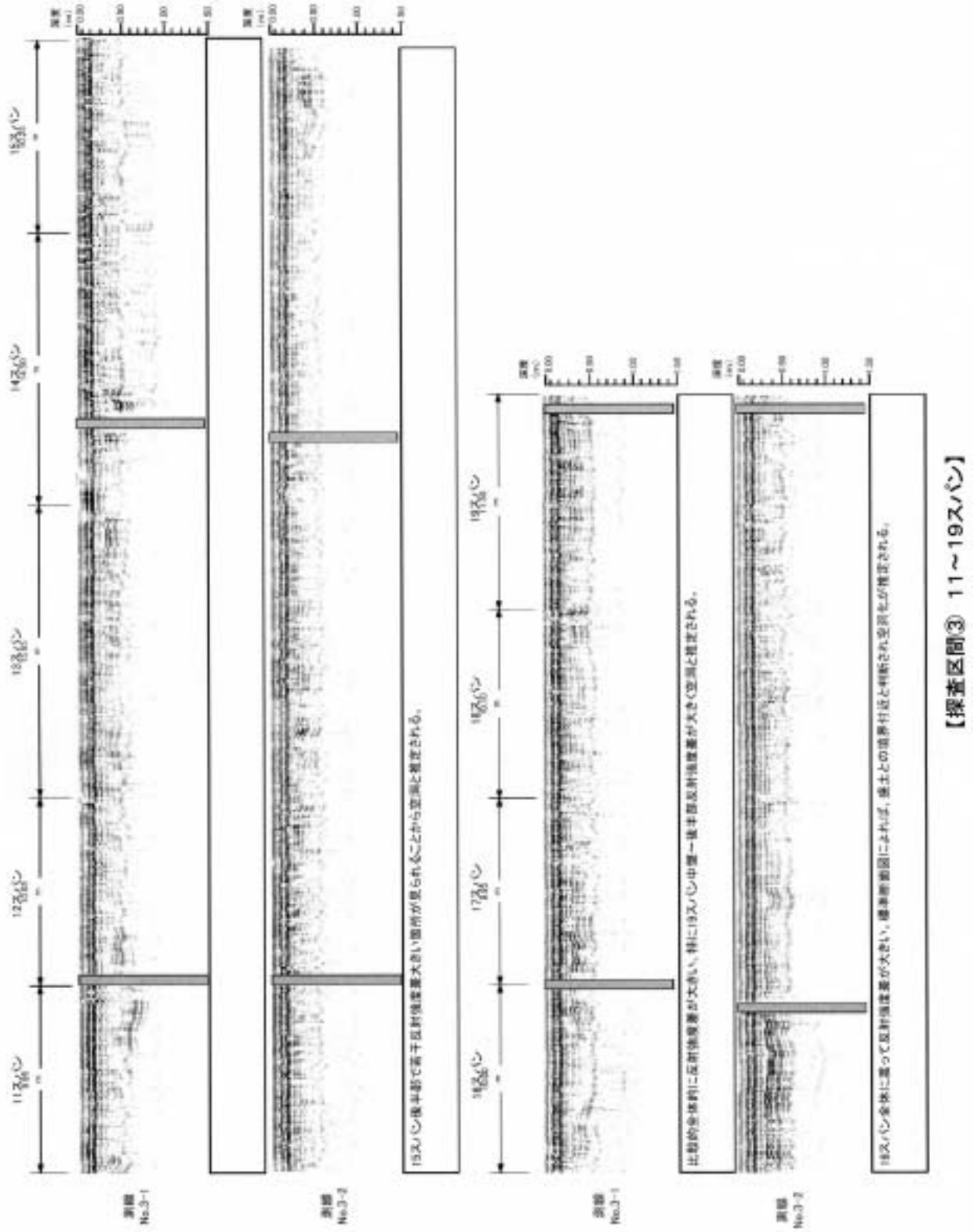


図12 レーダーチャートからの空洞等の判定 (6枚中の6)

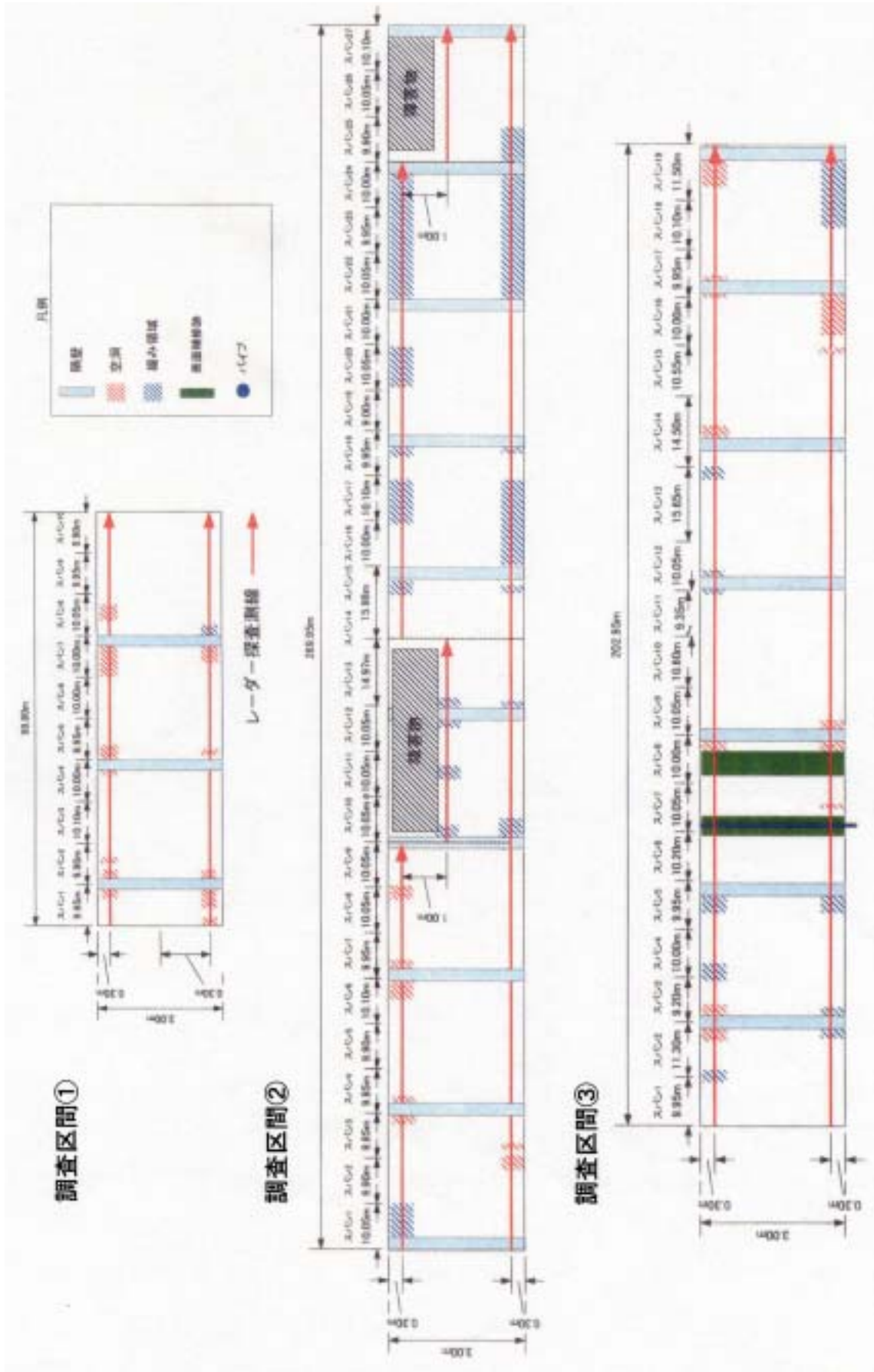


图13 空洞探查结果图

表2 今回調査結果と変状連鎖図の照合

変状連鎖図	堤内空洞化	天端工の破損・陥没	堤体の破損・陥没
目視調査	変状はあまり見られない	変状が顕著に見られる	変状が顕著に見られる
レーダー探査	探査結果から空洞が判別できる。	陥没して空洞が埋まってしまうと、探査結果には表れない	
今回探査区間との対応	区間 は主にこの段階。	区間 は主にこの段階。	なし

7.4 空洞の判定

利得調整処理と上下振幅を明瞭にさせるフィルター処理を行ったデータに対し、7.3に示した関連づけを基に、空洞の判定及びその他の吟味を行った。その結果を図12に示す。これより次のことが分かる。

- ・反射波は深度1.50mまで読み取れる。(500MHzアンテナの場合) 深度1.50m以深では急激に電磁波が減衰する。
 - ・レーダーチャートには堤防の構造を示す3層の水平の反射波形が見られ、測線毎に明瞭度は異なるが空洞を示す反射強度差が大きい水平多重反射や埋設物を示す凸型の反射波形を見ることができる。水平多重反射の多くは、水平な反射波形の1層目の下部と隔壁付近で確認できる。
 - ・反射強度差の大きい多重反射波は、区間 に多い。(区間のチャートでは、空洞と考えられる箇所を赤色で示した。)
 - ・空洞とは判断できないが、空洞波形に次いでやや強い水平の反射波形が捉えられており、空洞と同様にコンクリート版下部や隔壁近傍にあるため、今回の調査では緩み領域に相当するものと推定できる。特に隔壁付近に多く出現する傾向がある。
 - ・排水管など埋設物はほとんど見られない。(測線 の7スパンに1箇所あるのみ)
 - ・理由は不明だが補修跡では電磁波が減衰する傾向が顕著である。(測線 7スパン~8スパン)
- このチャートをもとに、空洞、ゆるみ領域を推定した結果を図13に示す。

7.5 レーダー探査結果と目視観察結果との比較

図13と図6を照合することにより、次のことが言える。

目視で変状の少ない区間 で、レーダー探査ではいくつかの空洞の存在が示されている。一方、水叩き面が波打ち状態であり、外観からも陥没が明確に分かる区間 では、レーダー探査では「空洞有り」と判定された区間が少ない。

また外観上、顕著な抜け上がり以外にも水叩き面やのり肩の小規模な段差が数箇所で見られたが、このような段差は主に隔壁付近で発生していることがレーダー探査から分かる。

7.6 変状連鎖図との関係づけ

今回の調査結果と図1の変状連鎖図を照合して関連性を検討すると、表2のように推察される。すなわち、区間 では、外観上は変状があまり見られないが、レーダー探査の結果内

部の空洞の存在が示された。一方、区間 は天端工(水叩き)が破損・陥没し、外観からも変状が顕著になっていて、区間 より変状が進行した段階といえるが、レーダー探査では空洞があまり感知されなかった。すなわち、水叩きが陥没すると空洞が埋まり、レーダー探査で空洞波形が現れにくくなるようである。

なお図1では、“堤内空洞化”の有無が点検指標として挙げられている。今回の探査区間 とも“堤内空洞化”あるいはその次の“天端工の破損・陥没”の段階に達していることから、補修を検討する必要があるといえる。

8. 他の探査事例との比較

本章では、三面張り堤防におけるレーダー探査に関する他の事例を示し、今回探査事例(岩手県脇之沢漁港海岸)との比較を行う。

8.1 三重県伊勢湾西南海岸の劣化状況調査事例 (国土交通省中部地方整備局)⁶⁾

この調査では、レーダー探査にドリル削孔を併用して空洞化を確認し、調査結果をもとに老朽度判定フローを提案している。それは目視を主体とした一次調査で老朽度要因を推定し、二次調査に進むフローになっている。二次調査では、レーダー探査のみでは誤差や解釈ミスが発生する可能性があることから、小径ドリル削孔も組み合わせる調査することとしている。空洞化は天端工・裏法工の破損・陥没、そして破堤を招く原因になるとし、空洞化の危険を示す現象として堤脚部侵食や吸い出しを挙げている。また前面の砂浜幅が小さいと空洞化が生じやすいと指摘している。

さらに、空洞がある場合の、波浪作用時の表のり被覆工の安定性照査方法を示している。

8.2 三重県香良洲海岸の劣化状況調査事例 (港湾空港技術研究所)⁷⁾

この調査では、レーダー探査のほか、ドリル削孔とCCDカメラでの内部探査、また実際の改修時期に合わせて床版を除去し内部の確認も行っている。

レーダー探査の測線は、今回の事例とは異なり法線直角方向である。裏のり肩寄りの水叩き面で強い反射波が認められ、実際に深さ40cm幅100cmの空洞が確認された。また法線方向に長く進展したひび割れがある場所で強い反射波が認められ、実際に深さ8cm程度の空洞が広範囲に確認されたが、

空洞範囲については推定と実測の間に最大2倍程度の違いが見られた。

また、目地周辺に空洞が存在する傾向が確認され、目地を介して吸い出しが発生する危険性が高いとしている。目地幅が他より広い箇所、目地材が消失している箇所、目地に植生が見られる箇所は留意が必要とし、目地の隙間にコンベックスを差し込む簡易な空洞確認法が示されている。また隣り合

う天端コンクリート間に段差あるいはずれがある場合や、法線方向に長く進展したひび割れがある場合も、空洞が存在する可能性があるとしている。

また基礎的な室内実験でレーダー探査の精度を確認しており、空洞の平面的な領域が把握可能なこと、また感度設定、倍率等の測定条件を的確に設定することにより空隙厚さも評価可能であることが示されている。

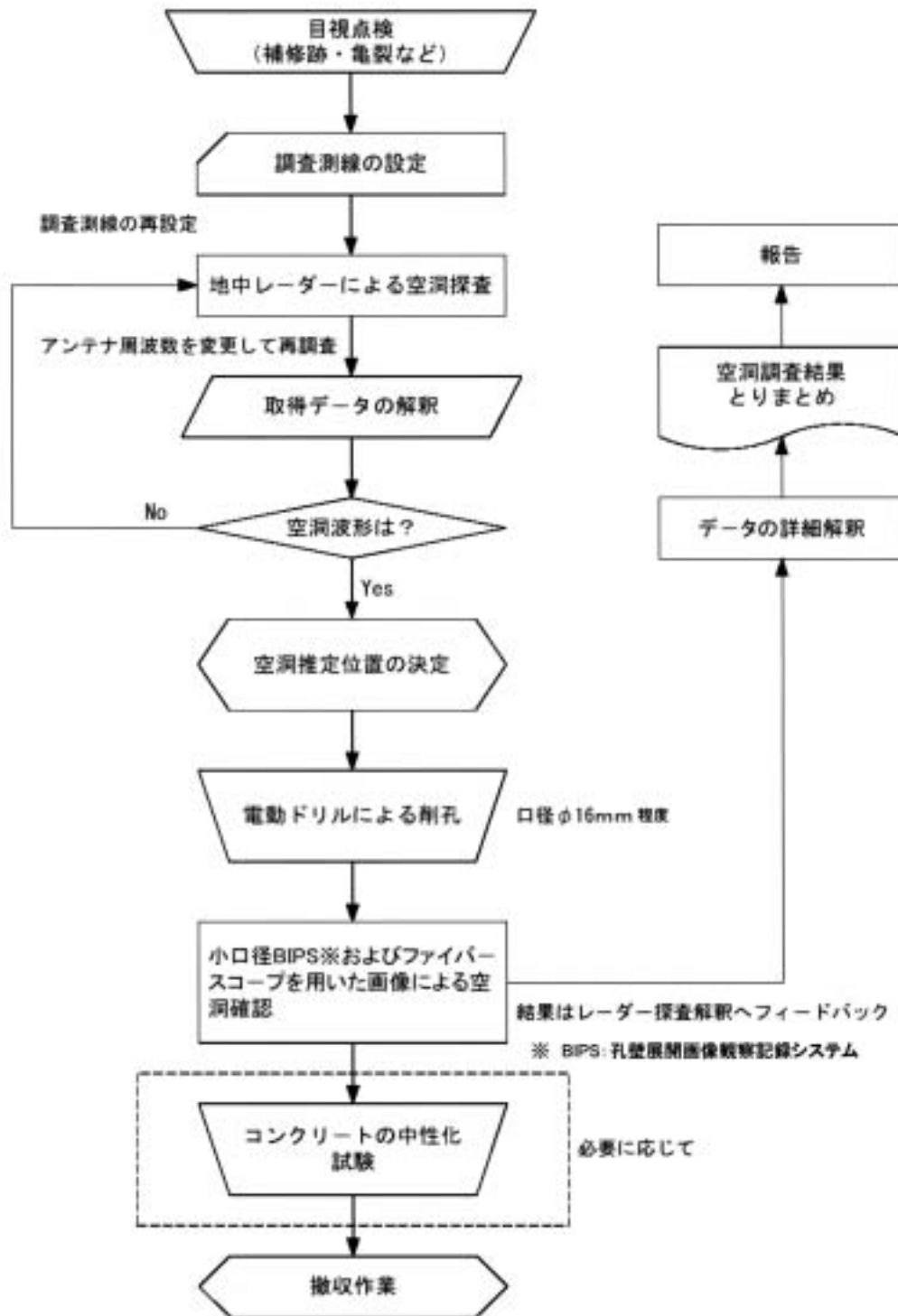


図14 三面張り堤防の空洞調査（レーダー探査 + 削孔）フロー案

さらに高潮・津波時を想定し、空洞を有する堤防に静水圧を作用させた解析を行い、数十cm厚程度の空洞は構造体全体の安定性には大きく影響しないことを示すとともに、防災機能を評価する上で空洞の有無を非破壊的に把握しておくことが重要と指摘している。

以上の検討を踏まえて、三面張り堤防に対する残存機能評価システムを提案しており、空洞の有無、広がり、厚さをおおよそ推定できる手法としてレーダー探査を位置づけている。なお探査測線は、裏のり肩において法線方向に取ることも有効としている。

8.3 今回探査（岩手県脇之沢）との比較

5～7章に示した今回の探査では、隔壁付近に空洞を示唆する反射波形が多いという現象が確認された。これは、目地周辺に空洞が存在するという8.2の指摘と合致している。隔壁の大部分は目地位置に設置されており、隔壁が埋まっている目地位置では不等沈下により目地ずれが大きくなり、吸い出しが多く起こるものと推察される。

また8.1では堤防法先の砂浜幅が狭いところで空洞化が生じやすいと指摘している。今回の探査区間中、空洞化が顕著な測線は、前面が岸壁状で砂浜が存在していない。こうした施設形状が空洞化の進行を加速させた可能性もある。

8.2は、堤防の裏のり肩に着目した調査となっているが、今回の探査ではパラペット寄りにも測線を設定し、その結果、空洞と推定される波形が両方の測線で得られている。

8.2が指摘する法線方向ひび割れは、今回探査区間には見られなかった。

また、8.1、8.2とも、ドリル削孔を併用して探査の精度を補っていることが注目される。

9. 今後のレーダー探査の活用

今回の探査結果から考えると、レーダー探査を最も有効に活用できるのは、堤防が「天端工に大きな破損は見られないが、建造後長期間を経過して空洞化が懸念される」という段階にあるときといえる。

また、三面張り堤防の空洞調査を確実にを行うには、地中レーダー探査を踏まえて削孔およびカメラによる目視を行うのが望ましいと考えられる。その調査フロー案を図14に示す。削孔して目視をすることにより、レーダー探査では分からない深さ（厚み）および状態を確認することができる。また、目視結果をもとに、レーダー探査のキャリブレーション値が的確に得られるので、レーダー探査全体の解釈精度が増す。

また、レーダー探査結果をもとに削孔位置をあらかじめ決

めるので、必要な箇所以外は削孔の手間がなく構造物へのダメージが少なく、コンクリート自体の劣化調査（中性化、塩分濃度）の追加も可能になるというメリットもある。

一方で、破壊探査の場所の選定、調査日数の増大（レーダー探査単独の場合と比較し3～4倍）、経費の増大というデメリットもあるものの、より確実な空洞調査を行うためには必要なルーチンであると考えられる。特に補修工事に取りかかるにあたっては、空洞の位置、規模（広がり・奥行き・容積）、状態を的確に知り、補修方法とその補修規模を算定する必要があるので、こうした場合に有効といえる。

一方、海岸保全施設は長大であるため、一次点検として、外観の目視から空洞化の有無を推測する手法の向上も望まれる。そのため今後レーダー探査を行うにあたっては、目視点検も平行して行い、外観の変状と空洞との関連性を検証していく必要がある。また、空洞存在時の堤体の安定性についても、今後さらに地震など動的な力が作用した場合の検討を進めていく必要がある。

備 考

本研究は、水産総合研究センターが水産庁から受託した「平成13年度海岸構造物の老朽化危険度の評価に関する調査委託事業」の成果の一部を基に、最近の知見も加えて再構成したものである。

謝 辞

探査の実施にあたり御協力頂いた岩手県漁港漁村課佐野一也氏、陸前高田市水産課千田顕彦氏、目視観察データの整理に従事して頂いた非常勤職員の石川典子氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局、沿岸開発技術研究センター：平成13年度海岸保全施設緊急防災対策調査報告書、2002。
- 2) 土木学会編：海岸施設設計便覧、土木学会（東京）、2000。
- 3) 物理探査学会編：物理探査ハンドブック 手法編、物理探査学会（東京）、1998。
- 4) 吉田直紹・遠座昭・望月健治・川合功一：既設トンネルの変状調査の現状と今後の維持管理のあり方、土と基礎50(7)、pp.16-18、2002。
- 5) 新谷毅、山田宏：下水管路施設周辺の空洞調査技術、土木技術57(12)、pp.73-78、2002。
- 6) 藤田光一・中村瑛佳・山本剛・田中浩充・鳥居謙一・野口賢二：伊勢湾西南海岸における堤防老朽度評価、海岸工学論文集第49巻pp.911-915、2002。
- 7) 独立行政法人港湾空港技術研究所：平成13年度海岸保全施設の残存機能評価システム構築検討調査報告書、2002。