

三次元地中レーダを活用した鋼矢板岸壁 エプロン部の補修履歴と吸出し空洞の評価

PRACTICAL USE OF THREE DIMENSIONAL GROUND PENETRATING RADAR TO DETECT BACK FILL REPAIRS BEHIND QUAY WALL AND TIDAL SUCTION INDUCED VOIDS

小池豊¹・三木偉信²
Yutaka KOIKE and Hidenobu MIKI

¹正会員 工修 ジオ・サーチ株式会社 企画開発部 (〒144-0051 東京都大田区西蒲田8-15-12)

²ジオ・サーチ株式会社 東日本事業部 (同上)

Tidal suction often results in voids behind sheet pile quay walls. Ground penetrating radar (GPR) is an effective technology to detect voids. The authors have developed software for 3 dimensional GPR analyses and had collected data at a sheet pile quay wall that has had frequent cave-ins in the past, and the data clearly shows the locations of previous cave-in repair works. In addition there are features in the data that indicate the existence of voids that could be caused by quay structure damage below sea level. Portable cone penetration test (CPT) results that were obtained at the above mentioned void locations indicate the presence of deep zone of loose soil where a strong tidal suction exists. That information shall be important information for asset management of shore structures.

Key Words : *Asset management, Sheet pile quay wall, Tidal suction-caused pocket, 3D ground penetrating radar, Cone penetration test*

1. はじめに

わが国では建設後 30 年を越える港湾施設が増えてきており、構造物のアセットマネジメントの時代を迎えるにあたり施設現況を正確に把握することが重要になっている。鋼矢板構造の岸壁背面には吸出し空洞が発生することは良く知られており、これまで非破壊で効率よく調査できる地中レーダを活用した調査が実施されてきている。ただし電磁波は透過性能から適用限界深度は 1.5m 程度となっている。より深い深度の状況を把握するためには、詳細な現地踏査やボーリング調査などがあるが費用や時間の面で現実的ではない。そこで従来の地中レーダで取得したデータを三次元的に解析して空洞の抽出のみならず岸壁背面の地盤構造上の特徴を抽出し、さらに深度 5m まで適用可能なポータブルコーン貫入試験を用いて地盤の緩み状態を把握することを組み合わせ、経済的でしかも詳細にかつ迅速に岸壁背面の状態を評価する手法の可能性について検討した。本論文では一連の検討結果についてまとめた。

2. 路面下空洞探査システムと三次元地中レーダの概要

地中レーダ法は地中に向けて発信した電磁波の反射信号を解析して地中構造や空洞の分布を評価する方法である。路面下空洞探査車は図-1 に示すような車両で、2.5m 幅を一度に測定できるように 7 個の地中レーダアンテナを搭載し、時速 50km にて調査が可能である。地中レーダで抽出した異常信号箇所を実施するスコープ調査とあわせて路面下空洞探査システムを構成する。1990 年に導入されて以降、全国の国道ほか主要道路の陥没防止のための調査に活用されている¹⁾。短時間で広範囲の対象を調査する際に有効であり、2005 年福岡県西方沖地震の際には損傷した港湾施設の被災状況調査に本システムが用いられ、施設の早期復旧に貢献した²⁾。

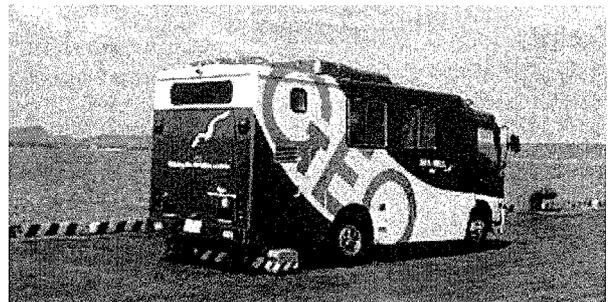


図-1 7 個のアンテナを装備した路面下空洞探査車

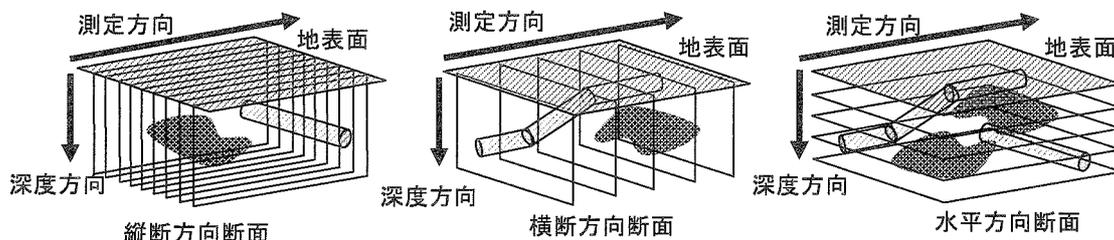


図-2 三次元地中レーダのデータ解析イメージ

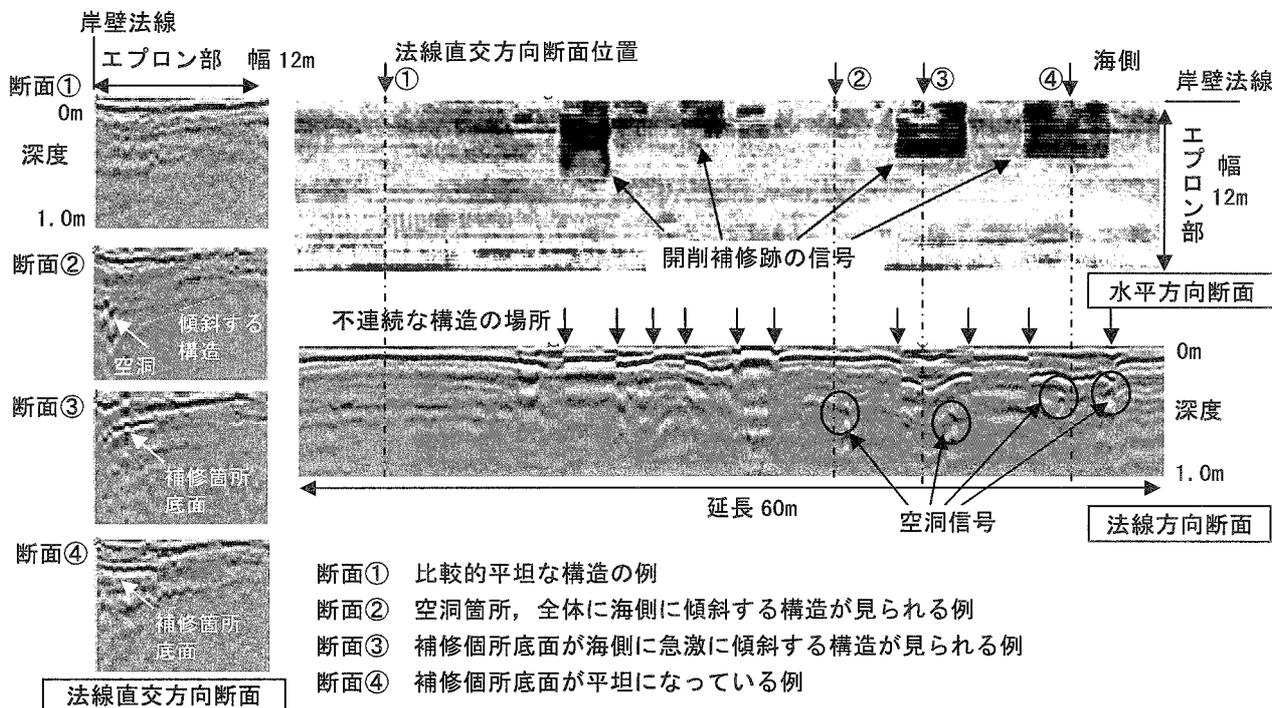


図-3 岸壁エプロン部で取得した三次元地中レーダのデータ例

地中に向けて発信した電磁波は含水比の高い土や水中では著しく減衰するため、実用的な適用限界深度は 1.5m 程度である。残留水位が高い岸壁エプロン部においては、深い位置での吸出し空洞の分布を把握することが困難である。

今回適用した三次元地中レーダはハードウェアとしての変更はなく、従来の装置で取得したデータを三次元的に評価するようにソフトウェアを開発したものである。従来は7個のアンテナのデータ(測線方向の縦断面データ)を個別に解析して空洞を判定していたのに対して、データを結合してフィルタリング処理することで、一度の測定で図-2 に示すように縦断方向だけでなく横断方向、水平方向に対して任意の位置での断面データを描くことができる。特に水平断面のレーダ反射信号によって測定対象の地盤構造や埋設物構造を容易に視覚化することが可能となる。道路下の空洞調査においては空洞の形状や周辺埋設物の配置などを同時に把握できる手法としてその有効性が示されている³⁾。

図-3 は今回の測定箇所で実際に取得したデータの例である。従来は図の下側に示した岸壁法線方向断面のデータから空洞の存在を特定していた。このデータの中には空洞以外にも路面付近の不連続な構

造が読み取れるが、それらがどのようなものなのかを把握することは困難である。これに対して水平方向断面として平面的に解析したものが上側の図である。法線方向断面で不連続となっている場所において四角の形状をした強い反射面が読み取れ、開削補修された場所と推定できる。場所によってはそれらが重なり合うように分布しており繰返し補修の経緯も読み取れる。また図の左側は法線直交方向の断面の例であり、舗装面下の構造を判断することができる。これらの情報から岸壁背面の状況を判断する。

3. 空洞および空洞直下の地盤状況評価

今回データを取得したのは図-4 に示す約 30 年前に建設された水深 10m の鋼矢板岸壁である。鋼矢板背面にはコンポーザーによる地盤改良が行われている。エプロン部には局所的に沈下変状が見られる。2.5m 幅を測定できる路面下空洞探査車(図-1)を利用した結果、延長 410m、幅 12m、4920m²の対象範囲のデータ取得は準備から撤収まで含めて約 1 時間であった。図-5 に示すように空洞は岸壁に沿って多数発生しており、起点側 200m 区間に 7 つの空洞

を検知した。空洞規模の一覧を表-1 に示す。図-6 に空洞の広がり例，図-7 に空洞箇所で撮影したボーリング孔内のスコープ映像を示す。

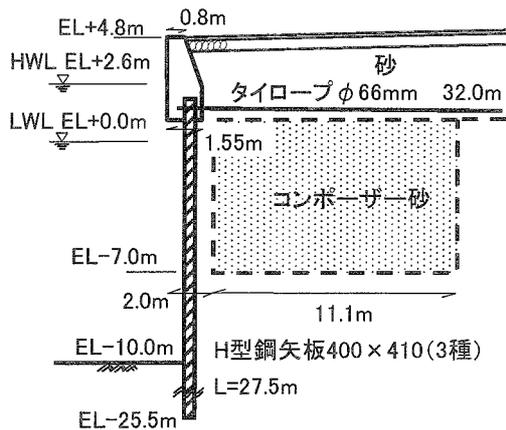


図-4 調査対象鋼矢板岸壁の概要構造図

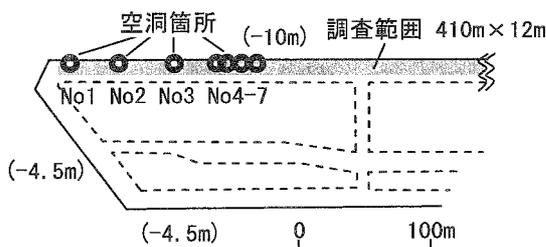


図-5 調査対象地域平面図

表-1 検知した7個の空洞規模一覧

諸元	最小	最大	平均
上端深度 (m)	0.30	0.60	0.41
法線方向長さ (m)	1.50	2.40	1.91
幅 (m)	0.60	1.80	1.28
厚さ (m)	0.14	0.47	0.31

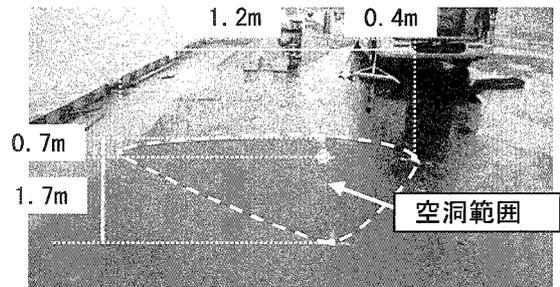


図-6 空洞の発生状況

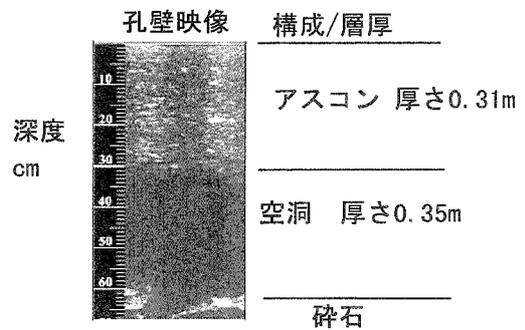


図-7 空洞箇所のスコープ映像

空洞発生箇所のうち3箇所でポータブルコーン貫入試験を実施したところ図-8 に示すようにコーン貫入抵抗は深度方向に特徴的な変化を示している。空洞直下では地盤は密な状態，満潮位の上側からコンポーザー上面までの潮汐力が最も作用する範囲では地盤は緩い状態，さらに矢板背面はコンポーザーによる改良が行われておりコーン貫入不能であり地盤改良は健全な状態となっている。この結果から潮汐力が大きく作用する深度で埋戻土の細粒分が流出してゆるみ領域が発生し，地盤全体が沈下することでエプロン部路面直下に空洞が発生している状況と推定した。

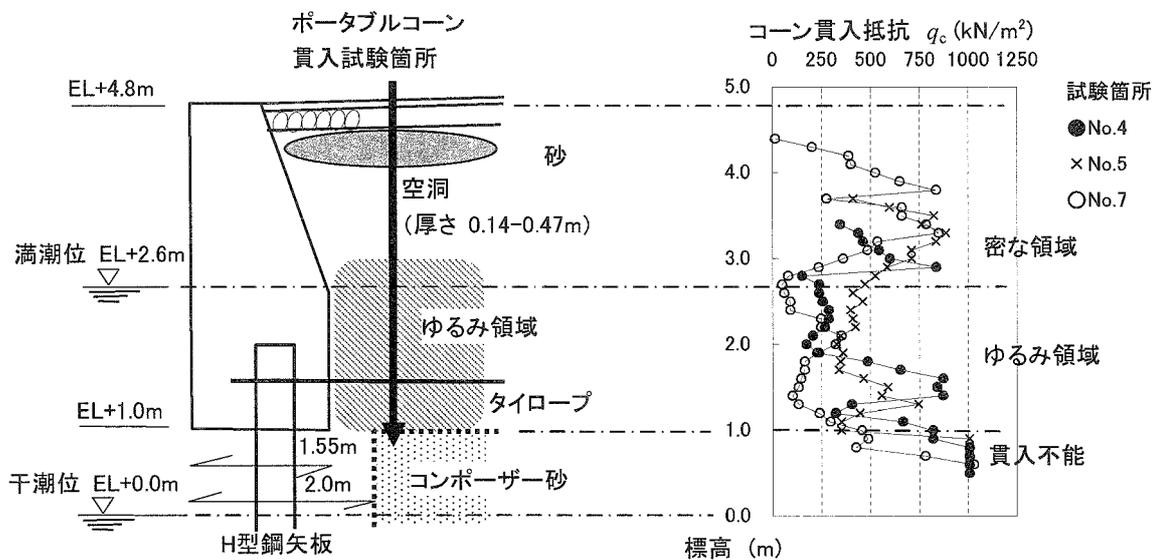


図-8 岸壁構造模式図とポータブルコーン貫入試験結果対比図

4. 三次元解析手法を用いた補修履歴の評価

今回の測定対象範囲は岸壁法線方向延長 410m, 幅 12m, 面積 4920m² である。測線数を表-2 に示す。アンテナ間隔が 0.35m であるので法線方向の測線数は 35 測線となる。また法線方向のデータ取得間隔は 0.07m であるので法線直交方向では 5857 測線のデータを取得したことに相当する。アンテナ1個を搭載したハンディ型地中レーダを用いた場合には, この面積に対して同等のデータ取得密度で, しかも位置情報を管理して計測することは現実的に不可能であることがわかる。三次元解析では, まず取得したデータをすべて結合し, 波形の調整, 各種のフィルタリング処理, データ補間処理など経て三次元のデータを作成した。その後, 任意の断面のデータを

表示して地盤内の構造的特徴を評価した。データの例を図-9 (起点から 50-120m 区間), 図-10 (起点から 120-190m 区間) に示す。

表-2 三次元解析に用いた測線数

測線の方向	測線長	データ取得間隔	測線数
法線方向	410m	0.07m	7ch×5 測線 35 測線
法線直交方向	0.35m×35 測線 12m 相当	0.35m	410m/0.07m 5857 測線相当

水平方向断面データ

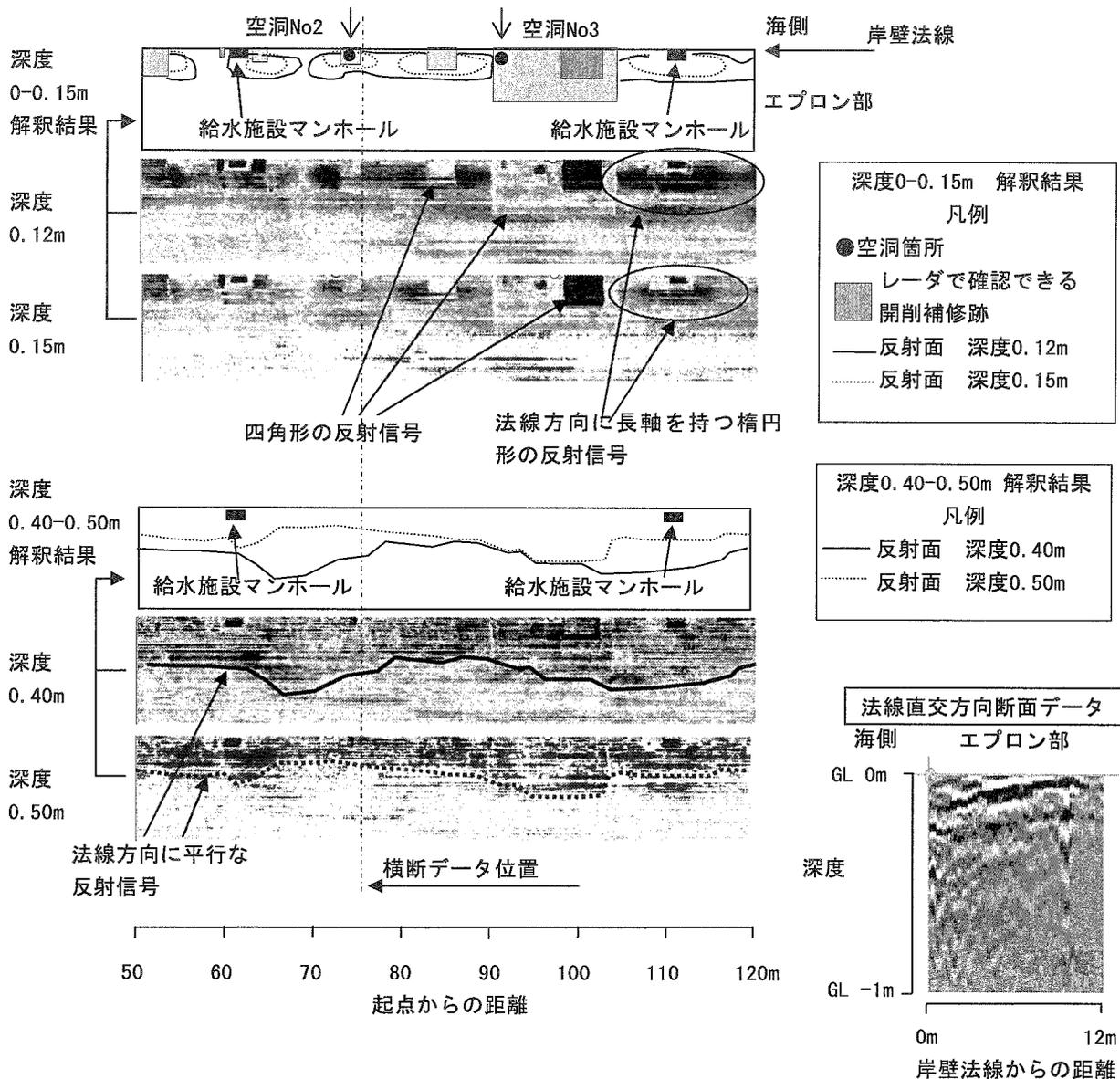


図-9 地中レーダ信号の三次元処理結果 (起点から50-120m区間)

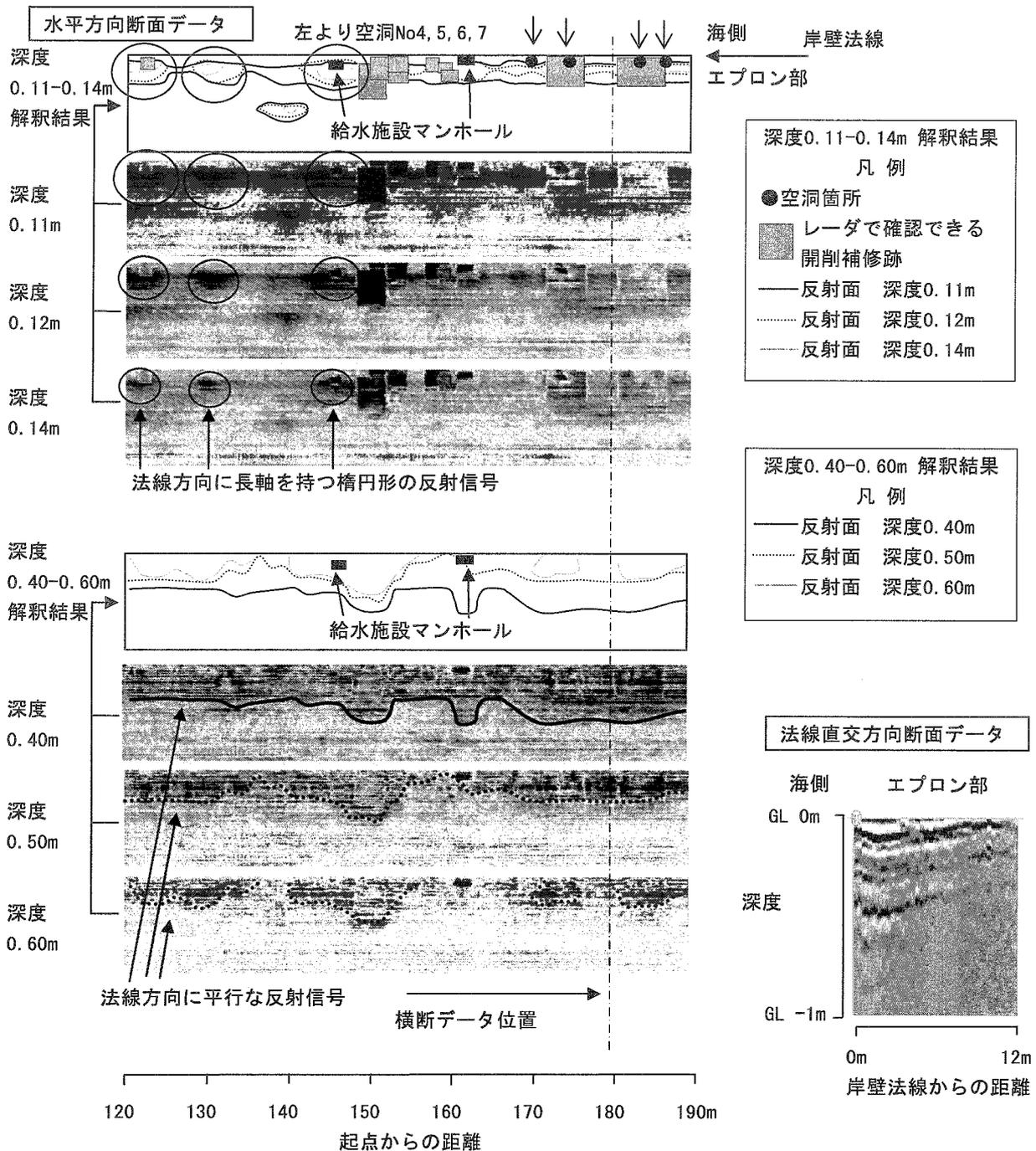


図-10 地中レーダ信号の三次元処理結果（起点から120-190m区間）

レーダデータを三次元平面処理すると、大きく3種の特徴的な反射信号を認識することができる。

第一の特徴的な反射信号は四角形の形状を示すもので、地表面から深度約0.3m付近に認められる。その規模、形状から過去において開削補修された跡と考えられる。補修箇所は重なり合っている場合もあり、過去に同一箇所を繰り返して補修した可能性も考えられる。レーダの反射強度を規定する物質の比誘電率が異なる埋戻し材料が使われたために特徴的な信号となっているものと考えられる。

第二の特徴的な反射信号は法線方向に長軸を持つ

楕円状のもので深度0.1mから0.3m程度の間認められる。アスコン下面相当の深度に当たる。この反射面は形状が変化しないかあるいは同心円上に深度方向に形状が小さくなるのが特徴である。すなわち深度方向に漏斗の先端のような形状を有している。その下方に水みちとなるような緩み領域の存在を暗示している。また第一の特徴的な信号である補修開削跡下方に向かって同心円状に傾斜するような形状を示していることも多い。すなわち過去において埋戻し土の吸出しのために路面が陥没した現象の履歴が残っていると考えられるものである。また空洞は第

一および第二の特徴的な反射信号の箇所一致するかその近傍に当たっていることが多い。

第三の特徴的な反射信号は法線方向に平行な反射面で、深度 0.4m から 0.6m 付近に認められる。路盤下面相当の深度に当たる。この反射面も形状が全く変化しないかあるいは等深度線が海側に向かって傾斜している特徴がある。傾斜する場合には海側に向かって埋戻し土の吸出しが卓越する場所を暗示している。図-9、図-10 には法線直交方向断面のデータも添付しており、海側へ傾斜するような構造を容易に読み取ることができる。

開削補修跡がある場所や海側に傾斜する構造がある場所では、吸出し現象が長期に渡っており、陥没が繰り返して発生している可能性が考えられる。これらの場所では鋼矢板が腐食して穴が開いている状態や、岸壁の目地が開いた状態があるものと考えられ、過去において本格的な補修対策を講じていないならば、今後も変状が再発する可能性が高く、早急に詳細点検を実施し、補修することが望まれる。

なお今回の事例ではレーダデータの三次元平面処理結果として空洞の平面的な形状は把握していない。これは空洞の大きさに対してアンテナ間隔が 0.35m (表-2 参照) と大きくなっているためである。レーダアンテナを小型化し密に配置した装置を用いた場合には 2. 路面下空洞探査システムと三次元地中レーダの概要で述べたように、空洞の形状が把握できることが明らかになっている³⁾。

5. 港湾構造物の点検における三次元地中レーダの今後の活用について

岸壁エプロン部で部分的に変状が生じたり小規模な陥没が発生したりした場合には日常の維持管理の中で補修されているのが一般的であり、詳細な工事記録は必ずしも残っていないという事例が多い。特に建設後 30 年を経たような構造物の場合には路面アスファルト舗装の全面打ち替えも実施されており、過去の補修履歴を把握することは困難である。

これまで地中レーダ調査は浅層部の空洞を把握するための詳細調査として位置づけられていた。三次元解析を実施することによって補修履歴箇所や地盤の構造的な特徴を抽出し、吸出し現象が発生している場所を特定できる可能性がある。また地中レーダは非破壊調査手法として高速かつ広範囲に測定ができることが大きな特徴であるため、地盤の構造に着目した上で、深い深度を簡易に調査できるポータブルコーン貫入試験のような地盤調査方法を併用すれば、より詳細な状況の把握が可能となる。

今後は日常点検の段階で三次元地中レーダを活用することで、抽出した問題箇所を港湾構造物のカルテに取り込むこと、さらに定期的な点検で問題箇所の経過観察をすることで劣化予測も可能となり、品質の高いアセットマネジメントに必要となる情報の

把握に寄与することができるものと考えられる。また豪雨や高潮や地震の影響があった場合の緊急点検においても有効に活用できるものと考えられる。

6. まとめと今後の課題

今回検討した結果は以下のようにまとめられる。

- ① 三次元地中レーダの活用によって、路面下の空洞の把握のみならず、過去の開削補修跡や吸出し可能性箇所を特定することができる。
- ② 路盤深度付近で海側に傾斜する地盤構造が認められる場合には、さらにその下方で吸出し現象が発生している可能性がある。
- ③ 岸壁背面には潮汐力が大きく作用する満潮位面以深において、緩い状態の埋戻し土が分布する領域（ゆるみ領域）があり、その下方に吸出しの水みちとなる構造物の損傷箇所が存在する可能性がある。
- ④ 開削補修跡や吸出し可能性箇所において、過去に構造物の本格的な補修対策をしていないならば今後も変状が再発する可能性がある。

今回は鋼矢板岸壁を事例に取り上げたが、現在、種々の構造形式の岸壁や護岸などへの適用性について検討を進めている。また地中レーダ装置についてはアンテナを高密度に配置して、分解能を向上させる取り組みも進めている。さらにポータブルコーン貫入試験が適用できない地盤に適用する他の簡易な試験方法についても検討している。

岸壁背面の状況について、高品質で分かりやすいデータを迅速にしかも経済的に取得し評価することができれば、今後は問題のある箇所を容易にカルテとして取りまとめることができ、日常の維持管理や経過観察、緊急点検に有効に活用できると考えられる。

謝辞：本論文執筆にあたり、データ取得をさせて頂いた港湾施設関係者ならびにデータの取りまとめに御助言を頂いた関係各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 雑賀正嗣, 太田雅彦, ウィルヘルム PJ ヴァンデルメア: 道路・港湾施設の予防保全における地中レーダ技術の活用の変遷と成果, 最新の物理探査適用事例集, 物理探査学会, pp.153-161, 2008.
- 2) 元野一生, 今永繁, 藤田浩一, 島野好: 福岡県西方沖地震における港湾施設の被災について, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.499-504, 土木学会, 2006.
- 3) 岡本順平, 天利典弘, 藤井邦男: 高解像度地中レーダシステム(G-Cube)を用いた空洞マッピングの有効性について, 第 20 回非開削技術研究発表会論文集, 非開削技術協会, pp.77-82, 2009.