

地下空洞調査におけるS波弾性波探査の有用性

東邦地水（株） 磯村 隆文

1. はじめに

(1) 地下空洞とは

地下空洞には、戦時中における防空壕掘削や、亜炭・磨き砂等の地下資源掘削による人工的なものがある(写真-1参照)。このうち、名古屋市近郊では明治時代から、家庭用あるいは工業用燃料として亜炭掘削が行われた記録が多く残されている。



写真-1 地下空洞の例¹⁾

採掘箇所では、地下空洞が残ったままの状態であることが多く、地下空洞上における構造物建設および既設構造物の維持管理では空洞壁や天井の崩落によって、地表に変状や陥没を生じたり、空洞の周辺地盤が緩んで支持力不足となったりするなどの問題が発生するリスクがある。

そのため、地下空洞の有無や規模を詳細に把握することは、事業を進める上で非常に重要である。地下空洞に伴う地表付近陥没の概念図を図-1に示す。

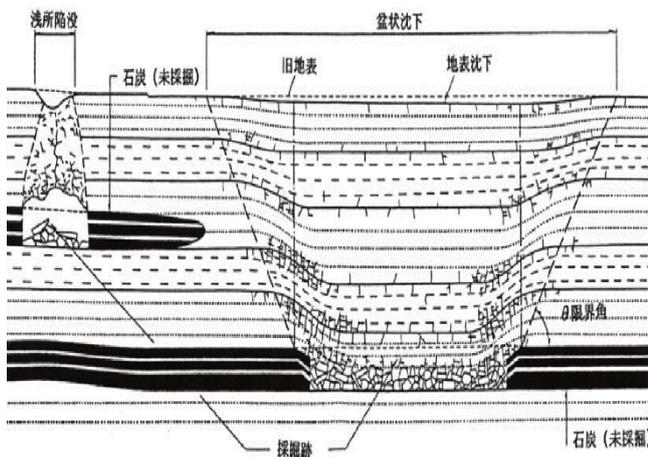


図-1 地下空洞に伴う地表付近陥没の概念図²⁾

(2) 地下空洞調査方法の概説

地下空洞調査は、まず机上調査で空洞の存在について情報を取得し、現地調査等によって地盤状況・特性を把握して、調査計画を策定する。その後、調査計画に基づいて、土質・空洞調査を行い得られた結果から充填工法などの対策工やモニタリングの仕様書が作成される。地下空洞調査手法例を図-2に示す。

土質・空洞調査には様々な調査方法があるが、各調査法とも適用限界がある。単独では地下空洞の把握が難しく一般に複数の調査方法を組み合わせて実施し、結果を対比した総合的な判断から地下空洞を把握する手法がとられている。

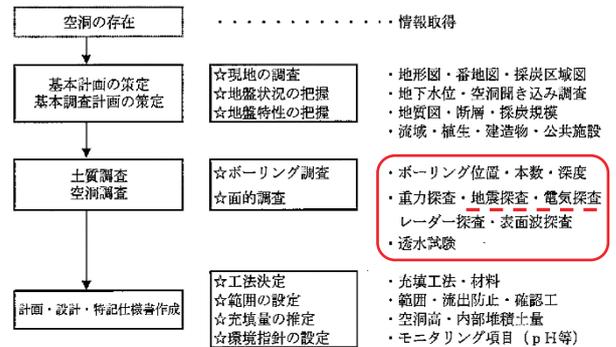


図-2 地下空洞調査手順例²⁾

(3) 今回の事例について

名古屋市東部丘陵地の宅地開発に当たり、地下空洞充填工事に伴い、充填工法の仕様を決定するために調査地の地下空洞を把握する必要があった。調査地の地形は切土造成による平坦地で、既往調査によれば地質は地表から鮮新統の粘性土、亜炭、砂質土が分布する。地下水位は標高 53.50m 付近に分布する。調査地には、断層分布や地質構造の変化が無いと判断される。

また、近隣造成時の情報から地下空洞は幅 2m 弱、高さ 2m 弱で、標高 48.50~50.50m 付近に存在する。このような状況から、地下水の影響が少なく平野等比較的弾性波速度が遅い場所でも速度変化を捉えやすいS波弾性波探査による空洞調査を計画し、結果検証のためにボーリング調査を行った事例である。

2. 地下空洞調査におけるS波弾性波探査

(1) 探査諸元や状況

調査対象地は35m×77mの広さである。空洞分布を詳細に捉えるために測線間隔は5m、解像度を確保するために受振点間隔は2mとした。S波弾性波探査の測線配置図を図-3に、諸元を表-1に示す。

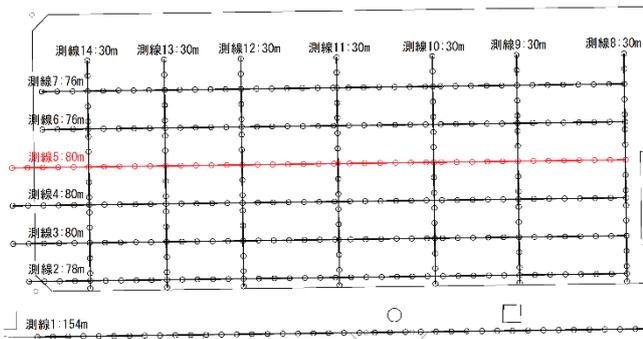


図-3 S波弾性波探査の測線配置図

表-1 本調査のS波弾性波探査の諸元

測線数	14 測線
測線長	30～154m
測線間隔	5m
受振点間隔	2m
発振方法	板叩き法

(2) 探査結果

図-3中に赤線で示した測線5におけるS波弾性波探査の結果を図-4に示す。調査地の地盤は標高54～55m以深に分布する $V_s=320\sim350\text{m/s}$ の「新鮮な地盤」、標高54～57m間に分布する $V_s=200\sim220\text{m/s}$ の「弱風化地盤」、標高57m以浅に分布する $V_s=120\sim150\text{m/s}$ の「強風化地盤」の3つに区分できた。そして「新鮮な地盤」中に、 $V_s=200\sim220\text{m/s}$ の低速度部「はぎとり法における段差(時間の遅れ)」を検出した。

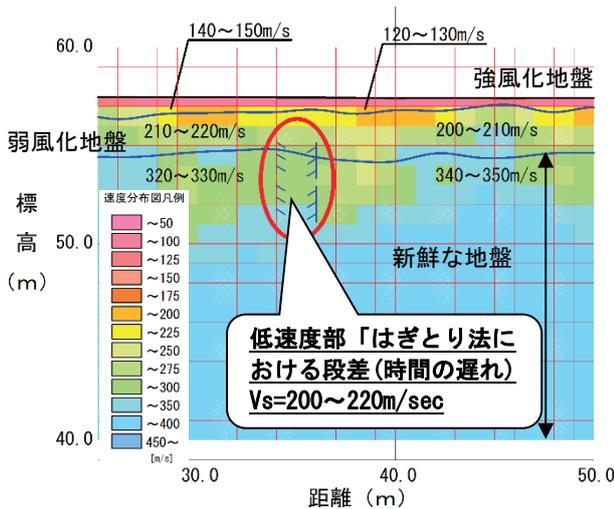


図-4 S波速度断面図

(3) 結果の評価

調査地には、断層分布や地質構造の変化が無いこと、低速度部の分布深度や幅が想定していた空洞状況と似通っていることから、今回検出した15箇所の低速度部は地下空洞、あるいは空洞周辺地盤の緩みを捉えたものと判断した。

(4) 検証

S波弾性波探査で検出した低速度部が地下空洞を捉えたものであるかどうかの検証と、地下空洞の規模や状況の把握のため、15箇所の低速度部の内、既設住宅に近接する箇所を除く12箇所でボーリング調査を実施した。

(5) 検証結果

12箇所のボーリング調査の結果、6箇所で明瞭な地下空洞を確認した。空洞の高さは0.80～1.30m程度であり、想定していた2mより小さかった。ボーリング柱状図とS波速度断面図との対比図を図-5に示す。

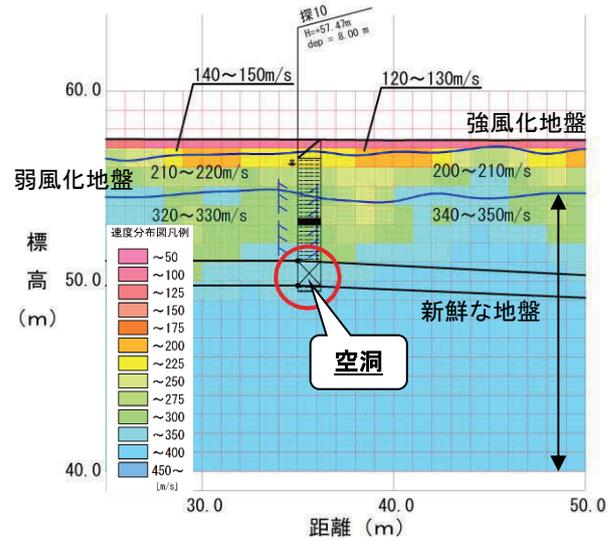


図-5 S波速度断面図と柱状図の対比図

3. S波弾性波探査の有用性検討

低速度部が地下空洞であるかどうかの検証のため行ったボーリング調査で、明確な地下空洞を確認したのは12箇所中の6箇所で確率は5割であった。残り6箇所については、以下のように評価した。

- ・ボーリング位置が空洞からわずかに外れており周辺の緩んだ地盤を掘削した。
- ・既に空洞が崩落して閉塞したものの、緩み域が上部に広がっている地盤を掘削した。

以上のことから、S波弾性波探査は平野部における比較的浅い深度に分布する地下空洞調査として有用であった。ただし、低速度部の全てが地下空洞とならなかったことから、他の調査結果を考慮して、総合的な見地からの判断が必要である。

今後は、S波弾性波探査を異なる地形・地質条件で実施して多くのデータを収集し、適用限界を把握するとともに、他の調査方法との組み合わせを検討し、地下空洞調査の効率化および精度向上を図っていく所存である。

《引用・参考文献》

- 1) 日本充填協会：改訂版空洞充填施工マニュアル 写真-3, 2004. 11.
- 2) 一般社団法人 充填技術協会：空洞充填調査マニュアル, p. I-7, p. I-17, 2016. 5.

鉛直磁気探査による埋設管調査事例

日本物理探査株式会社 ○岩下 昂 大垣 泰宏

1. はじめに

本稿は既設埋設管を対象とした磁気探査及び探針ボーリングの調査事例を述べたものである。結果から探査精度が分かり、今後の技術向上に繋がると考えた。

2. 探査概要

本調査は、土留鋼矢板打設延長上にあると想定される既設埋設管の平面的な位置と深度の把握を目的としたものである。

対象となる埋設管は外径 $\Phi 1,372\text{mm}$ 、南東から北西方面に敷設してあると予想され、鋼矢板打設工事がこれに直交する方向で検討されていた。

鋼矢板打設工事上のどこに埋設管が存在しているのかを把握するため、想定される埋設管位置の近傍で鉛直磁気探査を行い、その解析結果から探針ボーリングの位置を決定した(図-1)。

探査は設計埋設管位置の北西側と南東側でそれぞれ挟むように磁気探査孔を2点ずつ計4点設定し、その磁気探査の結果から、探針ボーリング孔を北西側(検断断面 A)と南東側(検断断面 B)でそれぞれ4点ずつ計8点を設定し行った。磁気探査No. A1

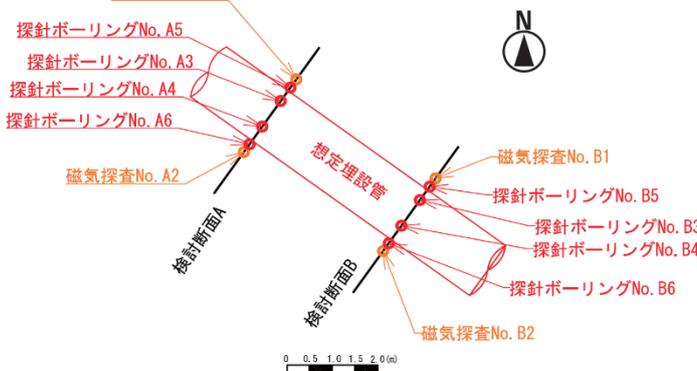


図-1 調査位置平面図

3. 探査方法

(1) 鉛直磁気探査

鋼管やダクタイル鋳鉄管、シールド工法によるスチールセグメントで覆われた埋設管等は、製造時の残留磁化及び地球磁場の誘導により磁化している。鉛直磁気探査は、磁化した埋設管近傍に設けた探査孔内で磁気傾度センサーを移動させ、埋設管近傍の磁場変化率を検知し管芯を求める調査である。

解析結果から得られた管芯深度に管径を考慮することで、埋設管位置を求めることができる(図-2)。

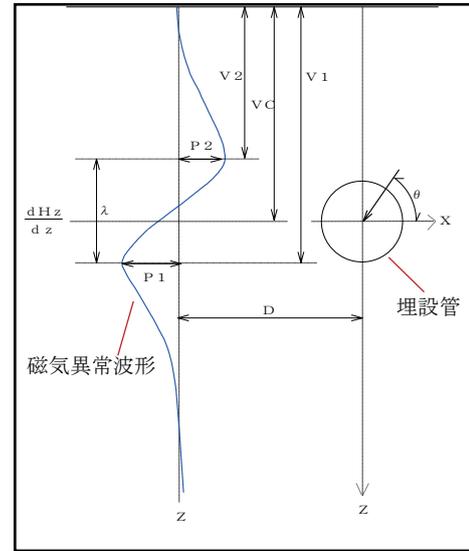


図-2 埋設管の磁気異常波形概略図

埋設管の平面的な位置は、管を挟むように設けた2つの探査孔から、それぞれの反応距離を円で描いた時の交点を通る線分と、探査孔間を結んだ線分との交点から求めることができる。

(2) 探針ボーリング

探針ボーリングとは、ボーリングロッドを用いて埋設管に「当てていく」及び「当たらないことの確認」作業のことである。

「当てていく」作業では、埋設管とボーリングロッドの接触深度を2点以上精度よく求めることで、その接触深度に外接する埋設管径($\Phi 1,372\text{mm}$)の円弧を描き対象の位置を求める。

「当たらないことの確認」作業では、想定される埋設管位置の横を掘削し、対象に接触しないことの確認をする(図-3)。

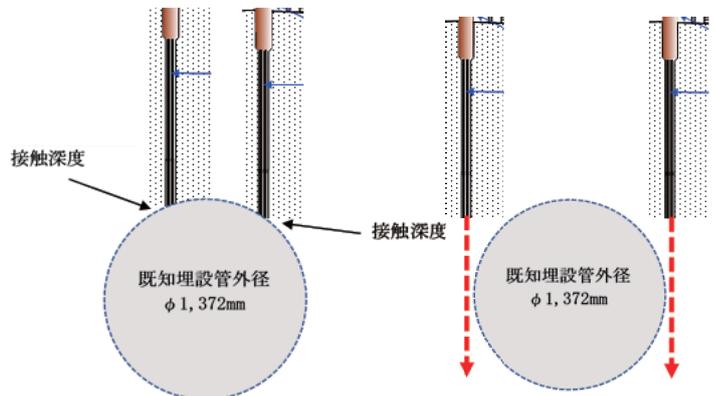


図-3 探針ボーリング概略図

4. 結果

(1) 埋設管の位置

黒円は探査当時の設計埋設管位置を、赤円は磁気探査によって求められた埋設管位置を示す。緑円は磁気探査の結果と探針ボーリングの結果をもとに、想定される埋設管位置を示したものである(図-4)。

深度は設計位置(黒円)よりも750mm 深い位置にあると求められた。

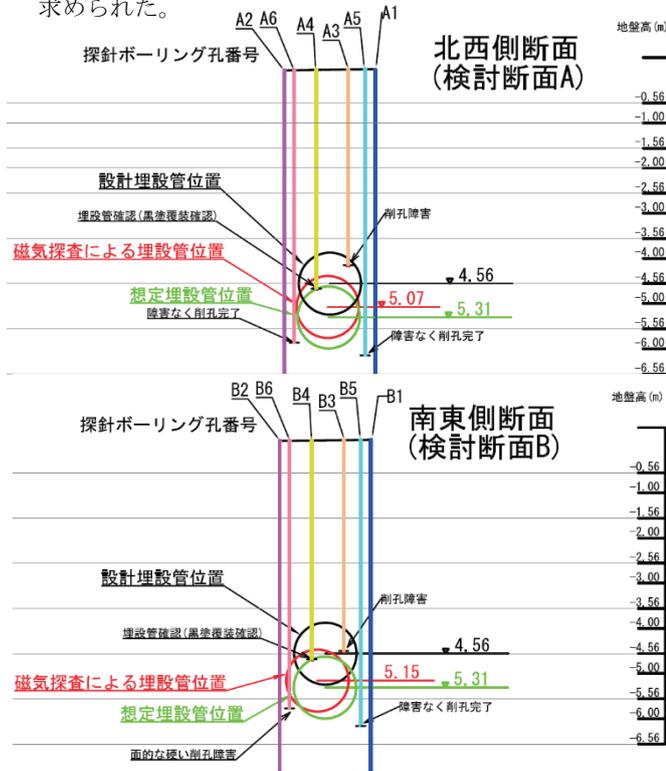


図-4 探査結果図

(2) 磁気探査結果の誤差

探針ボーリングの結果、埋設管は磁気探査の結果位置(赤円)よりも深い位置(緑円)にあるということが分かった。また検討断面 Bにおいて、当初は探針ボーリング孔番号 B6で、埋設管に接触すると予想された磁気探査の結果であったが、ボーリングロッドは埋設管に接触せず通過した。従って、磁気探査の結果からは水平方向の解析誤差があることになる。

磁気探査の結果と探針ボーリングの結果を比較すると、北西側では水平方向に20mm、深度方向に240mm のずれが見られる。南東側では水平方向に190mm、深度方向に160mm のずれが見られる。

5. 考察

ここでは、磁気探査結果の誤差が生じた要因について触れていきたいと思う。

まず、探針ボーリングの結果と比較して、水平方向及び深度方向ともに大きくずれが生じている南東側の磁気探査の測定記録の一部を示す(図-5)。

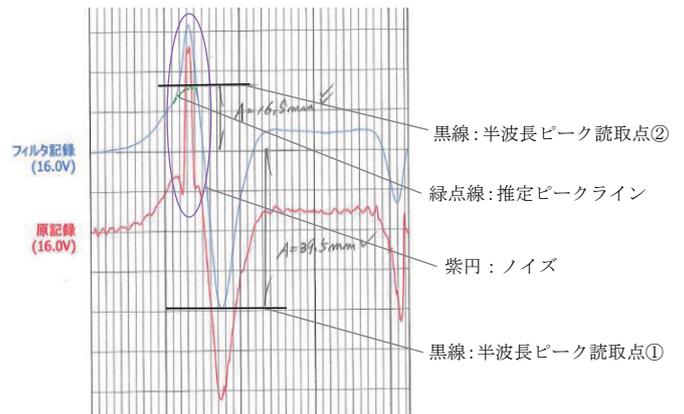


図-5 南東側の磁気記録

磁気記録から管芯並びに探査孔からの距離を求めるには、半波長のピーク2点の読取が必要になる。

図-5の磁気記録では、管の磁気信号上(原記録)に紫円で囲ったノイズが重畳している。この場合、本来のピーク点が不明瞭になり、対象の深度並びに距離にずれが生じてしまう。では北西側の磁気記録もノイズがのっているのかと問われるとそうではなく、比較的読取易い記録であった。よって読取時の誤差はほとんど考えられない。となると、解析誤差が生じた原因はノイズだけでなく、例として「そもそも埋設管が必ずしも理論モデルのように磁化しているとは限らない」等挙げられるが、実際のところは不明である。いずれにしても、磁気探査の精度としては±300mm の解析誤差を見込まなければならぬと考える。

6. おわりに

探査結果の精度を悪くする要因は様々にある。探査範囲に潜む測定障害は目視で分かるものもあれば、地中下で見えないものもある。実際の現場では後者が多い。

磁気探査結果の誤差要因はいくつか考えられる。

埋設管の目地部やフランジ部は本管と異種鋼製品であるため、それらがノイズ源となり解析精度の確保を阻害する。磁気波形がモデル波形に近似する限り、技術者間の解析に相違は生じない。しかし、当該事例のようにモデル波形を逸脱する場合は、その磁気波形をどのように評価するかでおのずと結果は異なってくる。

実験場で理想的な精度を出せていても、実際の現場で磁気波形モデルに沿うような測定条件ということはほぼない。そのような条件下で、対象となる見えないものの“影”を測定障害の中からどれだけ精度良く求められるのか、これが技術者に課せられたテーマである。

我々技術者がすべきところは、解析精度向上のためのデータと経験の蓄積であると考え。換言すれば、磁気波形の読取に対する客観的な評価の構築ともいえる。そして、可能な限り調査結果を検証する場に臨場し、良くも悪くも技術向上の糧とすることが重要であることを述べて本稿の結びとする。

鉄筋布設域への路面下空洞調査(地中レーダ探査)の適用事例

応用地質(株) ○上田 拓哉, 橋本 裕司, 村岡 直

1. はじめに

路面下空洞調査は、地中レーダ技術を用いて、地中の空洞発生状況を把握することを目的とする調査である。地中レーダ探査では、アンテナから電磁波を地中に放射し、その反射波を解析することで、地中の空洞を非破壊で可視化する事が可能である。

本稿では、築約50年が経過し、吸出しによる陥没が懸念される港湾施設のエプロンに対して、路面下空洞調査を実施した事例を紹介する。

本対象地には鉄筋が等間隔に布設されており、電磁波を用いる本手法では、鉄筋による電磁波反射像の影響により空洞からの反射像を見逃す恐れがあった。そこで本事例では、距離方向の移動平均値を各サンプル値から取り除く処理(以下、背景除去処理)により、空洞からの電磁波反射像を強調し、抽出する手法を取った。

本事例は、鉄筋コンクリート版下に発生する大規模な空洞による陥没被害を未然に防ぎ、施設維持管理を効果的に進めていくために非常に重要であると言える。

2. 調査の概要

(1) 地中レーダ探査原理

地中レーダ探査では、アンテナから電磁波を路面下に向けて放射し、誘電率が異なる媒質の境界により生じた反射波を受信する。図-1に異なる媒質による電磁波の透過と反射の様子を示す。電磁波が境界面に入射する場合の反射係数 R は以下の式で書ける¹⁾。また、表-1に主な材料の比誘電率の値を示す。

表-1と式-(1)より、空気の比誘電率が1であるため、空洞箇所において反射係数の絶対値が最大になることがわかる。また、空洞上面からの反射係数は必ず正になることがわかる。これらの特徴を基に、空洞の抽出を行う。

$$R = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

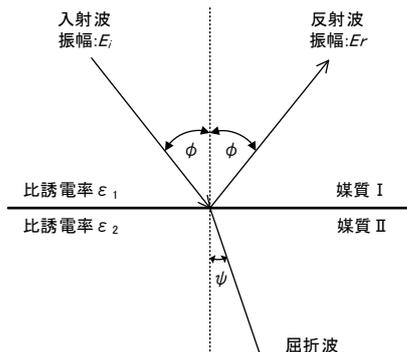


図-1 境界面における電磁波の反射と透過のイメージ¹⁾

表-1 主な材料の誘電率および比誘電率¹⁾

材料名	比誘電率	比抵抗(Ωm)	備考
アスファルト	4.5~9	数1000~数10000	材質、含水条件により変化
コンクリート	5~7	50~200	同上
砕石	7.5~18	10~数1000	種別、含水条件により変化
土砂	10~36	20~数1000	同上
空気	1	∞	

なお、鉄筋(金属)の比誘電率は無限大であり、式-(1)より反射係数は1となる。そのため、アンテナから放射した電磁波は鉄筋の上面で全て反射し、記録上に非常に強く現れ、空洞抽出の妨げとなる。対象としたエプロン舗装版の構造を、表-2に示す。

表-2 エプロン舗装版の構造

コンクリート厚	約0.20m
鉄筋間隔	約0.15m
鉄筋構造	1重、格子状(径は不明)

(2) 現地測定方法

地中レーダ探査の測定模式図を図-2に示す。測定時は、現地状況を考慮し、設定した探査測線位置に巻き尺を張り、それに沿って測定を実施した。使用した機器や測定条件を表-3に示す。

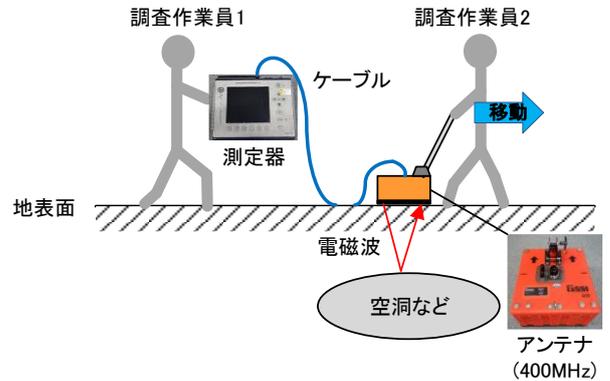


図-2 地中レーダ探査模式図

表-3 測定機器および測定条件

名称	仕様、測定条件など	製作会社	
測定器(SIR-3000)	スキャン	:100scan/m	GSSI
	フィルター	:FIRフィルター100MHz, 800MHz	
	表示部	:8.4in カラーTFT液晶	
	プロセッサ	:32bit RISC 206MHz	
	寸法	:315×220×105mm	
アンテナ(Model-50400S)	重量	:4.1kg(バッテリー含む)	GSSI
	中心周波数	:400MHz	
	寸法	:30×30×20cm	
	重量	:4.6kg	

(3) 背景除去処理の実施

本調査地の鉄筋は、格子状に等間隔で布設されているため、電磁波反射像は、同様に等間隔で現れると推定された。そこで、距離軸方向の移動平均値を計算し、各サンプル値から取り除くことにより、規則的に現れる鉄筋による電磁波反射像の影響を軽減し、空洞のように局所的に現れる電磁波反射像を強調する処理を行った。

背景除去処理のイメージを図-3の記録断面模式図に示す。上図が背景除去処理前の記録断面図、下図が背景除去処理後の記録断面図である。

図-3内の距離軸方向に等間隔に並ぶ赤線および水平方向の青線は、布設されている鉄筋による電磁波反射像および多重反射像を示す。これらが背景除去処理後には軽減され(図中では色を薄くして表現)、空洞による局所的な反射像が強調されることを示している。

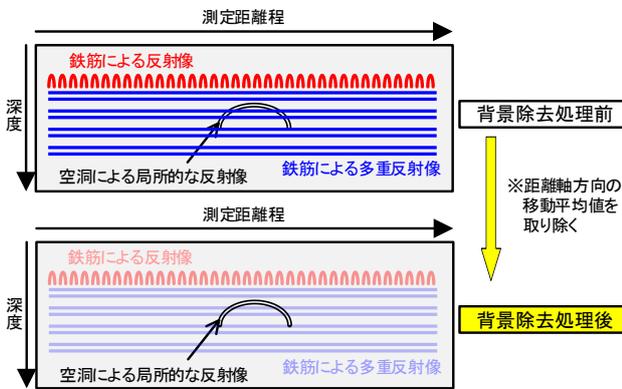


図-3 背景除去処理のイメージ

3. 調査結果

背景除去処理の適用結果(地中レーダ記録断面図)を図-4に示す。図-4の浅部に見える、上に凸状の白色の反射(約0.15m 間隔)が鉄筋による電磁波反射像であり、深部まで続く水平方向の反射が多重反射像である。また、黄色い枠で囲んだ幅約5m の上に凸状の電磁波反射像が空洞によるものである。これを見ると、処理前では鉄筋による影響で不明瞭であった記録が、処理後は強調できていることが分かる。特に水平方向の多重反射像は、ほぼ除去できている。

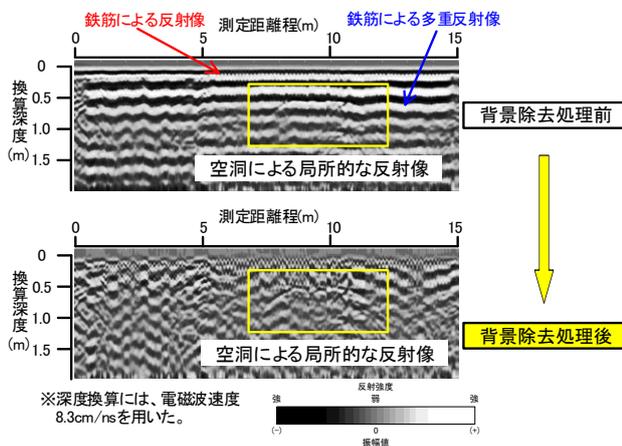


図-4 測定記録例

本地点について、削孔および孔内カメラ観察を実施したところ、空洞の存在を確認した。孔内カメラの観察結果(孔壁展開画像等)を図-5に示す。

本事例では、布設間隔約 0.15m の鉄筋について背景除去処理を実施し、空洞による電磁波反射像を抽出したが、鉄筋による影響はその布設間隔や径、また用いるアンテナの種類に依存することに留意する必要がある。また、本事例では鉄筋による多重反射像内の異常信号を抽出したが、浅部の鉄筋そのものの反射像内にある信号を抽出できるかについては今後のノウハウ蓄積が必須であると考える。

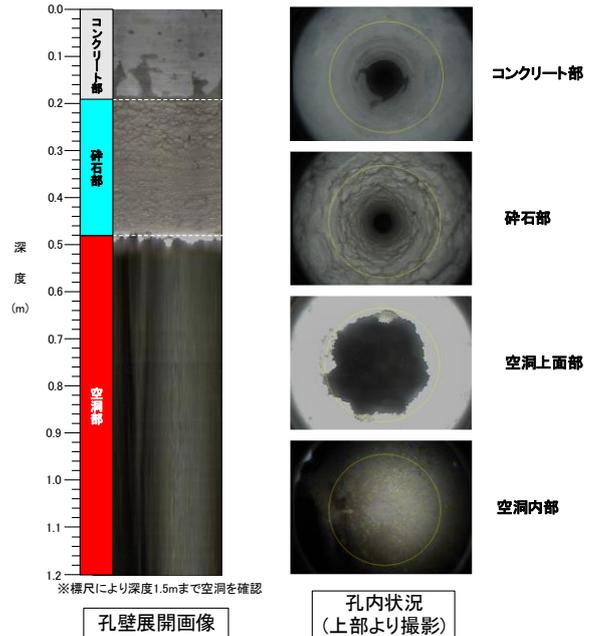


図-5 孔内観察結果

4. まとめ

本稿では路面下空洞調査(地中レーダ探査)の鉄筋布設域(港湾施設のエプロン)への適用事例を紹介した。

解析過程で背景除去処理を適用し、鉄筋による電磁波反射像を軽減し、空洞による電磁波反射像を強調することで、調査地内(測線長 19.6km)で 26 箇所の空洞を確認した。多くのエプロン舗装には鉄筋が布設されているため小規模な陥没が発生する可能性は低いものの、空洞が大きく成長した場合、大きな陥没が突然発生するリスクは高いと言える。そのため、これまで適用が困難であると考えられてきた鉄筋コンクリート版下の路面下空洞調査に背景除去処理を適用することは、大規模な陥没被害を未然に防ぎ、施設維持管理を効果的に進めていくために非常に重要であると言える。さらに、本事例の様なノウハウを継続的に蓄積し教師データとすることで、AI(人工知能)による自動抽出の発展にも寄与できると考える。

《引用・参考文献》

- 1) 路面下空洞探査車の探査技術・解析の品質確保コンソーシアム編:路面下空洞探査技術マニュアル(案), p.3, 2017.9

地中レーダー探査と表面波探査を併用した空洞および陥没調査

榎日さく ○堺田 佳人, 石川 恵司, 小野 篤, 鮎 沁

1. はじめに

地中レーダー探査は、空洞や埋設物、地盤構造等を電磁波の反射波画像で可視化できる手法¹⁾である。一方、表面波探査はS波速度構造から地盤の構造や強度を把握できる手法²⁾である。

本事例は、豪雨に伴い地盤の陥没が発生したサイト内において、地中レーダー探査により空洞の有無を、2次元表面波探査により地中レーダー探査で捉えられない地盤構造と緩みの有無を把握し、両者を統合した解釈により地盤状況や変状の原因について検討したものである。

2. 地盤条件と変状発生状況

(1) 調査地周辺の地盤条件

調査地は河川左岸側の氾濫原上に位置する。背後には段丘があり、河川により両岸が深く浸食された崖には更新世前期の基盤層が露出している。調査地の表層に深には礫質土層が分布すると推定される。上記地盤条件から、調査地周辺には河川の伏流水や段丘からの地下水流動の影響が懸念される。

(2) 変状発生状況

調査地周辺は、2017年7月の梅雨前線豪雨と2019年10月の台風19号により地表面が冠水し、これらの豪雨の後に陥没の発生が確認された（写真-1）。

陥没箇所は大部分が既設構造物の近傍に分布する。また地表面は砂利敷きで、水路や暗渠等は設置されておらず、降雨時には構造物や上方からの雨滴が滴下し、地盤に浸透しやすい状態である。なお、これら陥没箇所は砂利による埋戻しが行われている。



写真-1 陥没発生状況

3. 課題と調査方針

サイト内で発生した陥没はいずれも小規模であるが、既設構造物の各所に点在しており、広い範囲を限なく効率的に把握する必要があった。また、ボーリングやサウンディングといった直接的な確認手法は、既設構造物に影響を与える可能性があり採用できなかった。

上記課題を踏まえ、地盤条件を面的かつ効率的に把握する方法として非破壊手法の地中レーダー探査と2次元表面波探査を併用し、間接的ながら、サイト内を効率的

かつ多面的に検討することで、調査精度の向上を図った（図-1）。

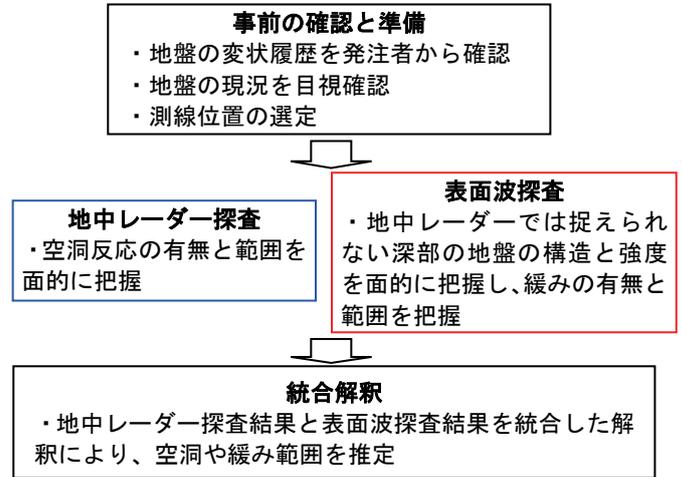


図-1 調査方針

探査測線は図-2のように、長辺最大125m×短辺最大65mの格子状に配置した。その他、陥没発生箇所付近は測線を密に配置する等、現地状況に合わせて配置した。調査作業は2017年12月（2017年豪雨後）と、2020年11月（2019年台風19号後）に実施したが、陥没箇所はいずれも埋め戻された状態であった。

なお、既設構造物の位置や形状等の情報について本報告では記載しない。

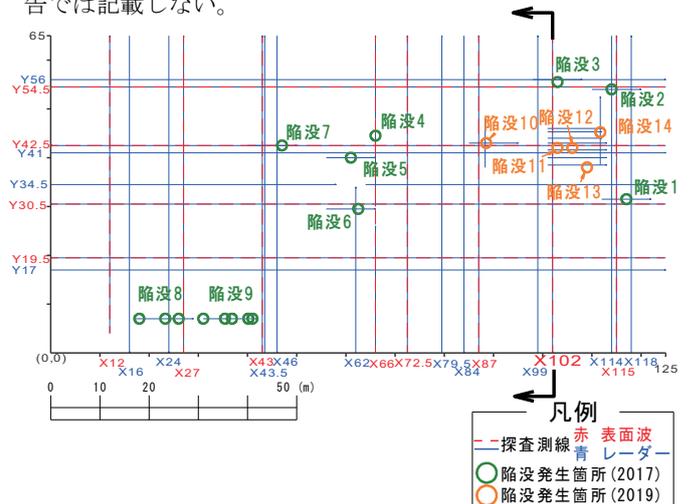


図-2 測線配置状況図

4. 調査結果

本報告では陥没が多く発生した X102断面（図-2中の黒太矢印の位置）を代表的な結果として示す。

X102測線周辺には、陥没3、11、12、13が分布する。

(1) 地中レーダー探査結果

図-3の地中レーダー探査結果によると、いずれの陥没箇所も埋め戻されたためか、地中レーダー画像に空洞反

応などの変化は見られなかった。しかし、深度約2m 以浅で散乱波が卓越する箇所は、不飽和帯において空隙が増加して不均質化している可能性がある。

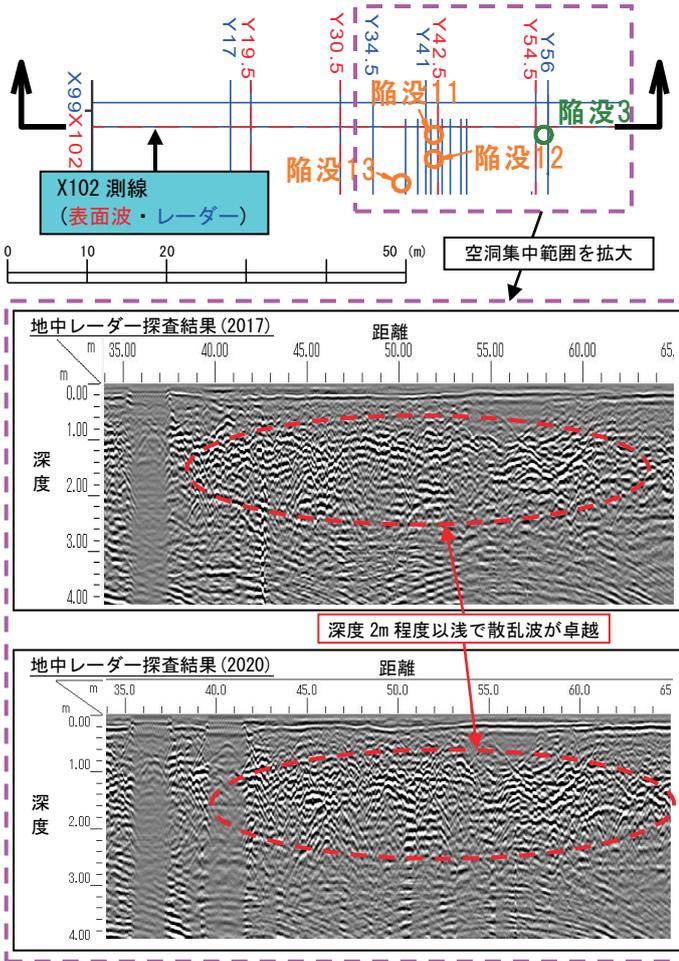


図-3 地中レーダー探査結果(X102測線)

(2) 表面波探査結果

図-4には、表面波探査によるS波速度断面図を示す。加えて、2時期(2017年および2020年)の間のS波速度の変化率も断面図として示した。なお、地下水面は、隣接する水路の水位から推定したものである。

陥没集中箇所では、陥没地直下から深部へ連続的に速度が低下する部分が見られ、雨食によるパイピングなど、緩みの進行を反映した可能性がある。

また、表層部以深のS波速度変化率は、地下水面を境に上位でマイナス側に大きく、下位で低い。これは、豪雨時での河川水位や地下水面の変動に起因した地盤強度の変化を反映した可能性がある。

(3) 統合解釈

2時期のS波速度構造と地中レーダー画像に、それぞれ大きな変化はないことから、地盤条件がともによく再現されていると考えられる。

上記の探査原理の異なる2つの結果を統合的に解釈すると、深度約2mまでの浅層部では散乱波が卓越し、かつS波速度変化率がマイナス側に大きい。これは構造物基礎に沿って雨滴の浸透によるパイピングが発生し空隙増

加している可能性が考えられる。

一方、地下水位以浅の不飽和帯においてもS波速度低下がみられ、地下水面までの空隙増加や緩みは、基礎直下の地下水流動部に沿う水位変動による吸出しに伴う細粒分の移動が考えられる。

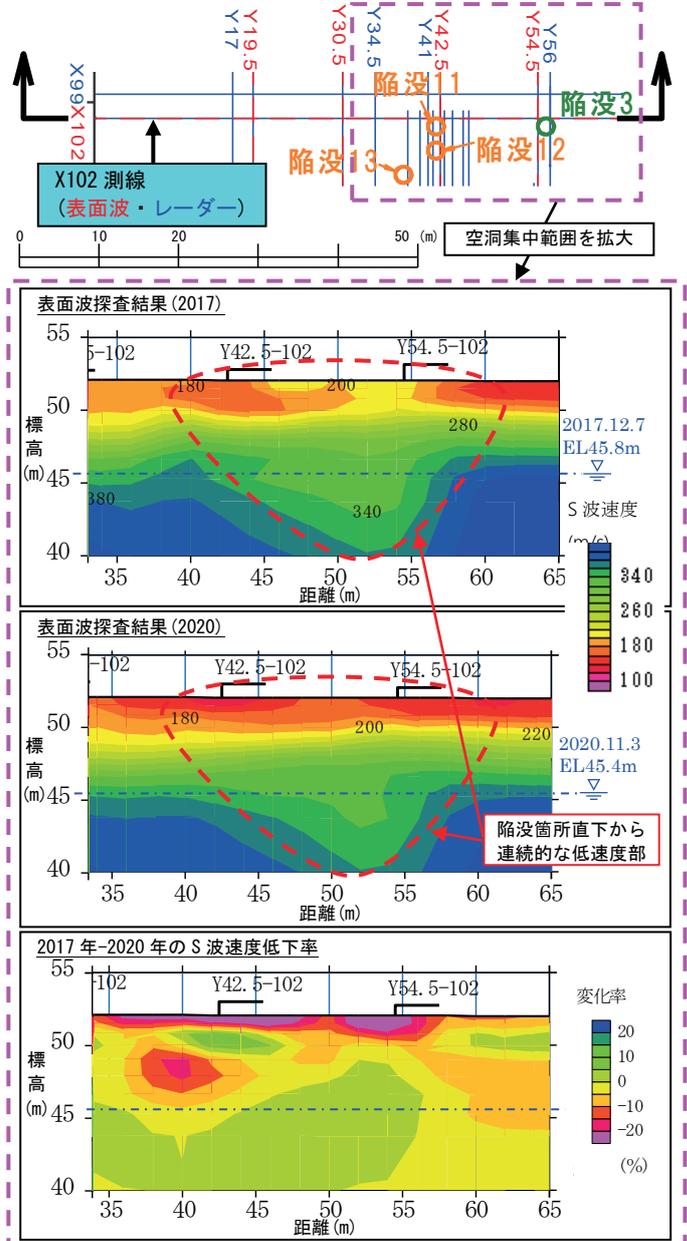


図-4 表面波探査結果(X102測線)

5. まとめ

本報告では、複数の物理探査手法を組み合わせることにより、地盤状況を間接的ながら広範囲に把握し、陥没の素因となる箇所を把握することができた。

各種の土構造物への応用や、物理探査と調査ボーリングやサウンディング等との組み合わせにより、調査コストの縮減や精度の向上に寄与できるものとする。

《引用・参考文献》

- 1) 地盤工学会編:地盤調査の方法と解説, p.127, 2013.3.
- 2) 地盤工学会編:地盤調査の方法と解説, p.146, 2013.3.

海底微動アレイ探査の調査事例

応用地質株式会社 ○井上雄介, 今井幹浩, 江波戸昌徳

1. はじめに

2019年4月から施行された「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」により、一般海域での洋上風力発電の開発環境が整った¹⁾。これにより、洋上風力発電施設に係る地盤調査市場は大幅に拡大している。地盤の支持層の分布あるいは工学的基盤深度の把握にはS波速度の測定が必須であるが、洋上においてはボーリング孔を利用したサスペンション PS 検層が一般的に行われている。しかしながら、洋上風力発電（着床式）は年平均風速7m/s以上、水深10～40m程度の海域を対象としており、厳しい環境下でのボーリング作業は容易ではない。著者らはこのような厳しい環境下でも短時間でS波速度構造を把握することができる海底微動アレイ探査システムを開発した。海底微動アレイ探査のニーズは高く、著者らは昨年までに計8サイト、56地点で探査を実施した。本稿ではこれまでに実施した調査のうち標準的な1サイトを選び、PS 検層結果と対比させた事例について報告する。

なお、当手法については2021年3月にNETIS登録を行っている。

2. 調査方法

本調査は海底地盤のS波速度構造を把握することを目的として、水深約13mの地点で実施した。海底は砂主体の地盤であり、地盤構造は広範囲で水平成層構造であることが既往の調査で確認されている。また、本調査地点は事前にPS検層により速度情報が得られている。

アレイ配置は4点正三角形配置とし、アレイ底辺長は50m、100m、200mの3パターンとした。

測定システムは海底地震計（2Hz）、Geometrics社製の独立型データ収録器（Atom）、Atomを海上に浮遊させるためのブイ、海底地震計とAtomをつなぐ信号ケーブル等で構成した。

海底地震計の設置はTrimble社製のRTK-GNSSを用いて船舶を目標座標に誘導し、海底地震計およびAtomを搭載したブイを海中に投入した。主な測定機器を図-1に、海底微動アレイ探査の測定模式図を図-2に示す。



図-1 主な測定機器（海底地震計（左）、独立型データ収録器 ATOM（中）、RTK-GNSS アンテナ（右））

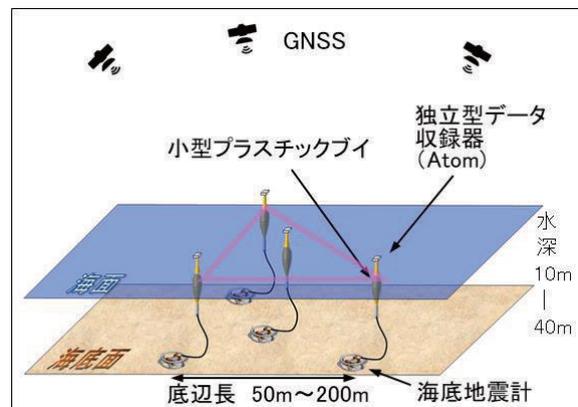


図-2 海底微動アレイ探査測定模式図

設置後の海底地震計の設置位置を特定するために、微動観測を1～2時間行った後、ブイの外周を船舶で航行しながら、船舶に取り付けた音波発振装置（OWS振源²⁾）を複数ヵ所で起振した（図-3）。

これらの一連の作業は人員4～5名、1地点あたり1～2日で実施できるが、有義波高1.0mを超える海象条件では作業が難しく、有義波高0.5m程度の穏やかな海象条件が測定実施の目安になる。

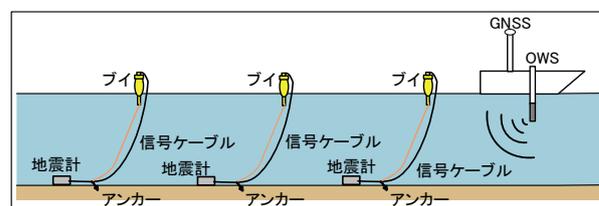


図-3 海底地震計の設置位置特定 概念図

3. 調査結果

海底微動アレイ探査により得られた観測波形のフーリエスペクトルを図-4に示す。各地震計のスペクトル分布は整合的であり、良好な波形記録が得られたと考えられた。各地点の観測波形から空間自己相関関数法（SPAC法³⁾）を用いて作成した周波数領域の位相速度イメージを図-5に示す。この図より0.7～2.9Hz付近で位相速度が滑らかに繋がる観測位相速度曲線が得られた。これにより、海底面においては波浪や海流による振動ノイズの影響が少ない良好な結果が得られたことを確認できた。

S波構造の算出方法は、遺伝的アルゴリズム⁴⁾による逆解析手法を用いた。観測で得られた位相速度曲線と得られたS波速度構造から求めた理論位相速度曲線を図-6に、またS波速度構造を図-7に示す。位相速度曲線は観測と理論で整合する結果となった。

得られた S 波速度構造は最小アレイ底辺長の関係から深度30m 以浅の S 波速度構造は既往の PS 検層結果とやや乖離するものの、深度30m 以深の S 波速度構造及び工学的基盤深度 (S 波速度 $\geq 400\text{m/s}$ に相当する深度) は既往のボーリング孔内の PS 検層結果と整合的する結果が得られた。

4. まとめ・今後の課題

海底微動アレイ探査を実施したサイトのうち、PS 検層結果と対比させた事例を示した。海底微動アレイ探査で求めた S 波速度構造は PS 検層結果と整合的であることから逆解析によって得られた S 波速度構造の妥当性を示すことができた。

一方で長いケーブルを扱う作業の安全上、最小アレイ底辺長は50m が限界であるために極浅部の位相速度を捉えきれていないという課題が残った。今後は地盤条件、水深、波浪などさまざまな条件が異なる海域における適用事例を蓄積していくとともに、極浅部層の S 波速度構造を把握するためのシステムを新たに開発していく予定である。

《引用・参考文献》

- 1) 牛山泉 (2020) : 急進展する洋上風力発電、基礎工、**48**, 12, 1.
- 2) 小倉公雄・荘司泰敬・大橋武一郎 (1999) : 多層円盤を用いた孔中振源の開発、物理探査, **52**, 2, 141-152.
- 3) Aki., K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors: Bulletin of the Earthquake Research Institute, **35**, 415-456.
- 4) 山中浩明・石田寛 (1995) : 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, **468**. 9-17.

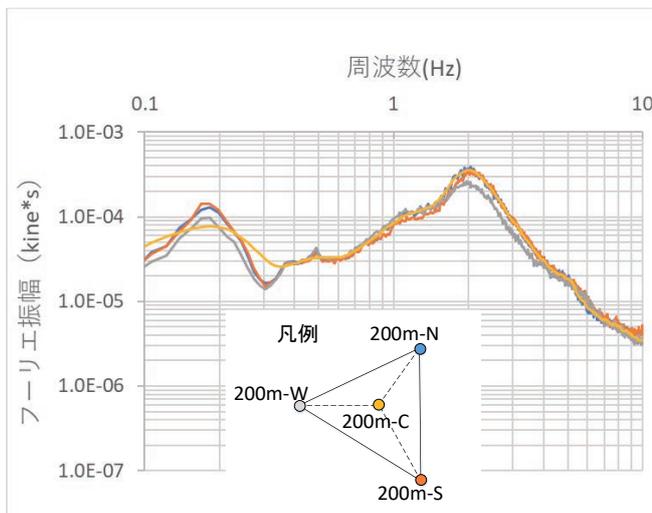


図-4 200m アレイにおけるフーリエスペクトル

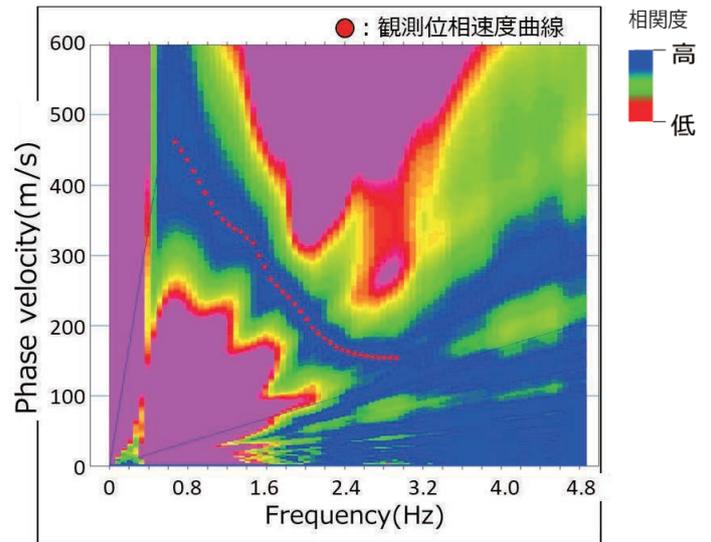


図-5 周波数領域の位相速度イメージ
(赤丸: 観測位相速度曲線)

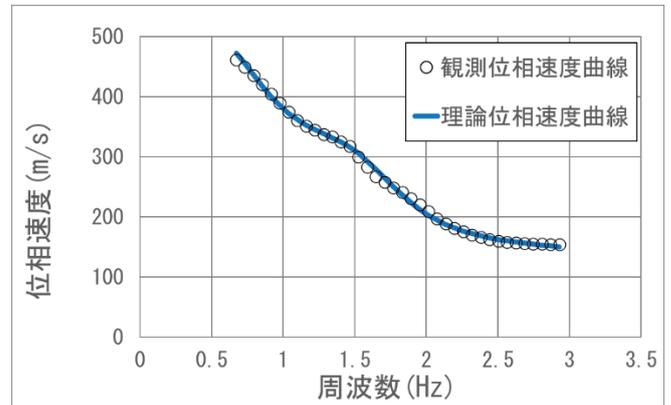


図-6 観測位相速度曲線および理論位相速度曲線

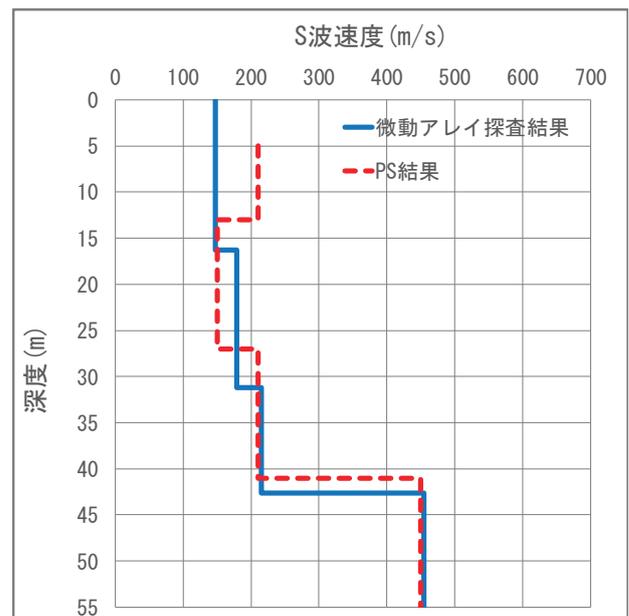


図-7 S 波速度構造

【041】

三軸磁気探査装置による鋼管杭の先端深度と方向の特定について

株式会社メーサイ ○山口博久, 中野真治, 塩崎宜史

1. はじめに

従来の磁気探査装置には、鉛直方向(Z軸)の磁気センサーを内蔵したプローブが用いられてきた¹⁾。これに加えて、水平方向(X軸,Y軸)の磁気センサーを内蔵したプローブを用いる三軸磁気探査装置が開発された。この三軸磁気探査装置を用いれば、従来の磁気探査装置では困難であった磁気物の方向が特定できる。報文は、既設の支持杭(鋼管杭)に近接して打設された防護杭(鋼管杭)を対象として、先端の深度と調査孔からの方向を特定した事例である。

2. 三軸磁気探査装置の概要

三軸磁気探査装置²⁾(MAGLog-3、ジオファイブ)を使用した。先端のプローブ(直径:34mm)には、三軸の磁気センサー(X軸,Y軸,Z軸)を採用している(写真-1)。



写真-1 プローブ先端

3. 上下端深度の検出実験

離隔50cm離れた位置の鉄パイプ(直径:40.5mm, 深度:2.5~3.5m)の上下端を検出する実験を実施した(図-1)。

鉛直方向(Z軸)の差分値(上下0.5m)のピークは、鉄パイプの上下端深度と一致している。

水平方向(X軸,Y軸)に着目する方法がある。X軸とY軸の方向を固定できない場合には、水平方向の合成値 $[H=\sqrt{X^2+Y^2}]$ に着目する。水平方向の合成値(H)のピークは、鉄パイプの上下端深度と一致している。

鉛直方向(Z軸)の差分値と水平方向(X軸,Y軸,H合成値)のピークを併用することで上下端深度を正確に検出できる。

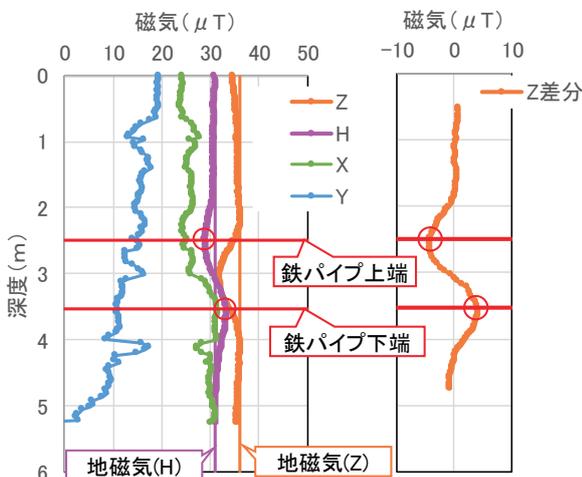


図-1 磁気探査結果

4. 磁気物の埋設方向の特定実験

磁気物(鋼管杭等)の埋設方向を特定するためのモデル実験を実施した。大型バケツの中央に、磁気探査プローブを設置し、X軸を磁北方向に合わせた。Y軸方向は、東方向となる。磁気物は、地磁気によって、上端はS極(マイナス)、下端はN極(プラス)の磁気を帯びる(図-2)。

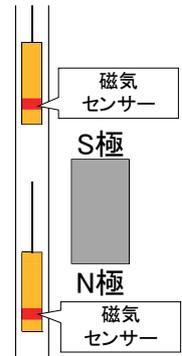


図-2 磁気物端部の磁気



写真-2 埋設方向の特定実験

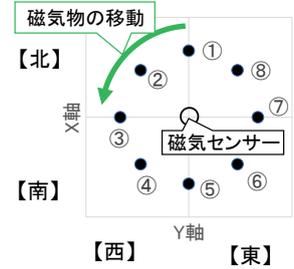


図-3 重錘の設置方向

標準貫入試験の重錘(63.5kg)が磁気センサーより上方にある場合(N極)と下方にある場合(S極)の2ケースで実施した。重錘を大型バケツの①(磁北方向)に設置し、②~⑧まで順次移動させながら、磁気(X軸,Y軸)を測定した。重錘を離れた位置においた状態で地磁気を測定し、測定値から地磁気の値を引いた補正值を表示する。

(1) 磁気物(N極)を感知した場合(図-4)

『磁気物の埋設方向』と『磁気センサー(補正值)表示の方向』の象限が一致を示す。

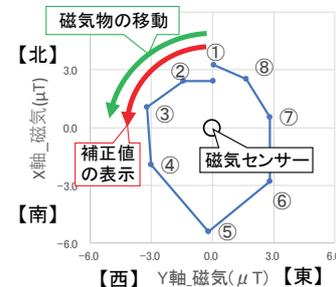


図-4 磁気センサーの表示
(磁気物:上方、N極)
【象限が一致を示す。】

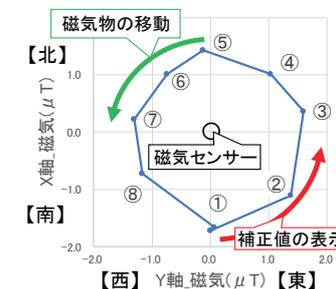


図-5 磁気センサーの表示
(磁気物:下方、S極)
【象限が反対を示す。】

(2) 磁気物(S極)を感知した場合(図-5)

『磁気物の埋設方向』と『磁気センサー(補正值)表示の方向』の象限が反対を示す。

5. 鋼管杭の深度と方向の特定実験

河川内の支持杭(鋼管杭 直径:812mm)とその周囲に配置された防護杭(鋼管杭 直径:412mm)を対象に実施した(写真-3)。

磁気探査調査は、河床より8.2mの高さにある河川上の足場から実施した。調査孔としては、塩ビパイプ(VP-50)を使用した。孔口の高さは、河床から8.55mである。孔口から11.2m区間は、保護用のケーシングパイプ(直径:116mm)内に塩ビパイプを設置した。

調査孔の位置を中心に、鋼管杭(支持杭と防護杭)の方向を図-6に図示する。磁気物は④~⑦方向にある。

磁気検層プローブに角ロッドを取り付け、X軸を磁北方向に合わせて、回転しないように、調査孔に貫入する。引抜ながら、磁気探査を実施した。磁気探査結果を図-7に示す。深度11.2mまでは、ケーシングパイプ内であり、磁気物の影響を受けない。

磁気探査結果の鉛直方向(Z軸)に着目すると、深度18mに変曲点があり、防護杭の下端に相当する。これ以浅では支持杭と防護杭、これ以深では支持杭がそれぞれ磁気物となる。防護杭の下端については、鉛直方向(Z軸)の差分値、水平方向(X軸)のピークの深度が一致している。

図-8は、防護杭の下端深度より上下部1m区間の測定値から地磁気³⁾を引いた補正值を表示したものである。下端は、N極であることから、図-4に示すように、表示される象限が一致する。磁気物(鋼管杭)は、図-6に示すように④~⑦方向にあることから、図-8の表示は正しい。

6. おわりに

三軸磁気探査装置を用いた磁気探査により、鉛直方向(Z軸)の差分値と水平方向(X軸,Y軸,H合成値)のピークを併用することで、磁気物の上下端深度を正確に検出できる。水平方向(X軸,Y軸)の測定値から地磁気の値を引いた補正值を表示することで、調査孔を中心に全方向で、磁気物の方向を特定できる。三軸磁気探査装置に用いられる磁気センサーは感度が高く、地中の磁気物に加え、地表面の磁気物からの磁気にも反応する。適用事例は、周辺に磁気物が無い場合と深度が深く地表面の磁気物の影響が無い場合である。今後、適用事例を増やし、地中の磁気物の調査孔からの方向に加えて距離についても把握できるように知見を得たいと考えている。

《引用・参考文献》

- 1) 関東地質調査業協会編:「ボーリング孔を利用する原位置試験についての技術マニュアル」、pp.315~322、1995.10
- 2) 小川光喜他:「高分解能3軸磁気検層装置の開発と適

用」、全地連技術フォーラム2015論文集、論文 No.26、2015.9

- 3) 国土地理院地磁気測量(https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_04/index.html)[確認日:2021.5.1]



写真-3 鋼管杭(支持杭と防護杭)の設置状況

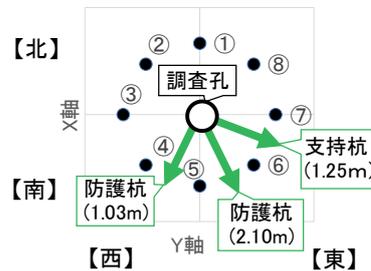


図-6 鋼管杭(支持杭と防護杭)の調査孔からの設置方向

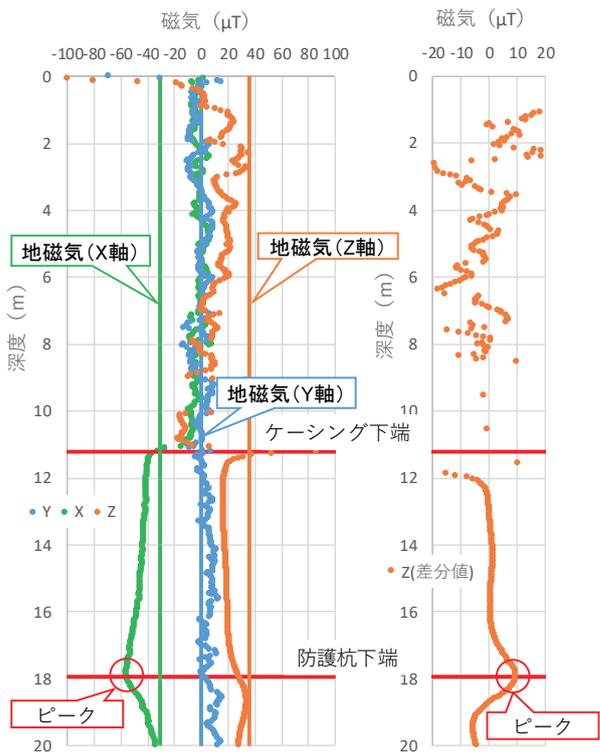


図-7 磁気探査結果

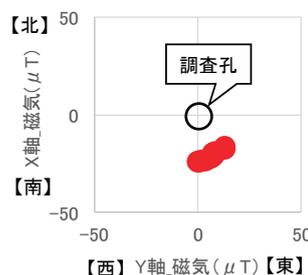


図-8 磁気センサーの表示(磁気物:N極)【象限が一致を示す。】

電磁ハンマーの開発と適用例

株式会社ジオファイブ ○鎌田 晋哉, 高橋 亨, 五江 潤 通

1. はじめに

近年、各種社会インフラの老朽化が大きな社会問題になっている。各種構造物の健全性を調べるために人力によるハンマー打撃(打音検査)が広く用いられているが、これに替わるものとしてソレノイドを応用した小型振源を開発した。この振源は起振力が大きく、かつ高い周波数特性に加え、繰返しレートも速いのでトンネル背面の空洞調査の他、コンクリート壁の剥離や杭・鋼矢板等の根入れ深さ測定等への適用が期待できる。

今回、開発した振源の性能を評価することを目的に、重力式コンクリートダム堤体にて、弾性波の伝搬試験等を行ったので、以下、その結果について述べる。

2. 電磁ハンマーの概要

開発した電磁ハンマー(ポータブル振源と呼ぶ)の構成と動作について、以下に述べる。

(1) 電磁ハンマーの構成

ポータブル振源は、ソレノイドを駆動する高電圧パルス生成する制御装置部と、高電圧パルスを受けて打撃を行うソレノイドハンマー振源部から構成されている。振源には、使用状況に則して、簡易かつ効果的に弾性波を発生させるため、原動力の小さいタイプ(小型と呼ぶ)と大きいタイプ(大型と呼ぶ)の2種類を用意している。制御装置は共通である。図-1に装置一式の写真を示す。



図-1 ポータブル振源の写真

(2) ポータブル振源の動作

制御装置のPOWERを入れると昇圧が始まり、昇圧が完了するとREADY LEDが点灯する。この状態でHITスイッチを押すと打撃が行われる。打撃は約5秒間隔で行うことができる。また、トリガー検出用に圧電素子を内蔵しており、起振時には、アナログ信号で瞬時に出力し、データ収録装置にトリガー信号として入力することが可能である。表-1に仕様を示す。

表-1 ポータブル振源の主な仕様

仕様	
制御装置	
駆動電圧、パルス幅	300V、10~80msec (可変)
繰返しレート	4~5sec
寸法・重量	151×101×200mm、2.2kg
振源 (大型)	
ストローク	50mm
ブランジャー重量	1kg
寸法・重量	80×90×350mm、5.1kg
振源 (小型)	
ストローク	18mm
ブランジャー重量	0.09kg
寸法・重量	φ80mm×300mm、1.6kg
振源共通	
トリガー検出方式	圧電素子

3. 適用性の検証

ポータブル振源の適用性の検証のため、重力式コンクリートダムの監査廊と法面を利用して弾性波の伝搬・透過試験を行った¹⁾。

(1) ダム監査廊における伝搬試験

監査廊底盤上にて、ポータブル振源(小型)により表面波を発生させ、コンクリート面上での伝搬性能を確認した。比較のため、木製かけやによる起振も行った。測定条件は以下の通りである。

受振点：40cm 間隔で24個
 受振器：固有周波数4.5Hz、上下動ジオフォン
 振源距離：49.6-59.2m
 振源：ポータブル振源、木製かけや

図-2に波形記録例を示す。卓越する波形が表面波である。この結果が示す通り、小型のポータブル振源でも、50mを超える震源距離でも十分なS/N比が得られていることがわかる。

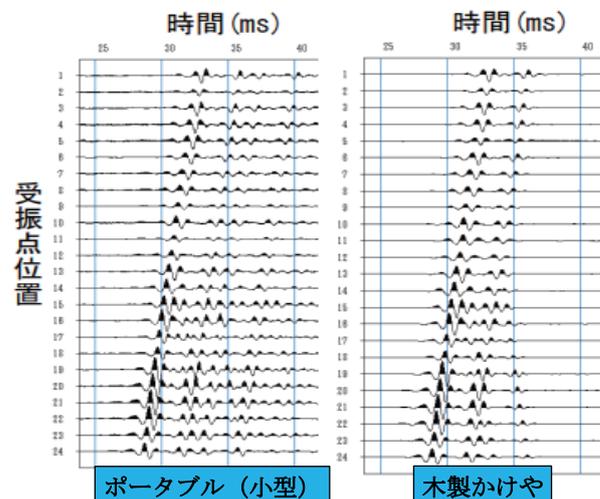


図-2 ポータブル振源と木製かけやの比較

(2) 監査廊-法面間の透過試験

透過試験は、監査廊内で起振し、対抗する下流側法面上の水平ひび割れの上下に平行に設置した測線長9.2mの2測線で受振する試験を行った。比較のため、木製かけやによる起振も行った。測定条件は以下のとおりである。

受振点：水平2測線（間隔0.8m）、40cm 間隔、24個
 受振器：固有周波数40Hz、上下動ジオフォン
 起振点：監査廊壁（水平打撃）
 起振源：ポータブル振源（小型、大型）、木製かけや

図-3に、ポータブル振源（小、大）と木製かけやの1回の起振時の記録例を示す。距離25m の堤体を透過した弾性波（P波、S波）が確認できる。記録されたS波の最大振幅を比較すると、ポータブル振源（小、大）、及び木製かけやの比率は、1：3：19であった。大型では1回の起振で、木製かけや同様、P波、S波が確認出来、小型でも、加算をすれば検出可能であることがわかった。

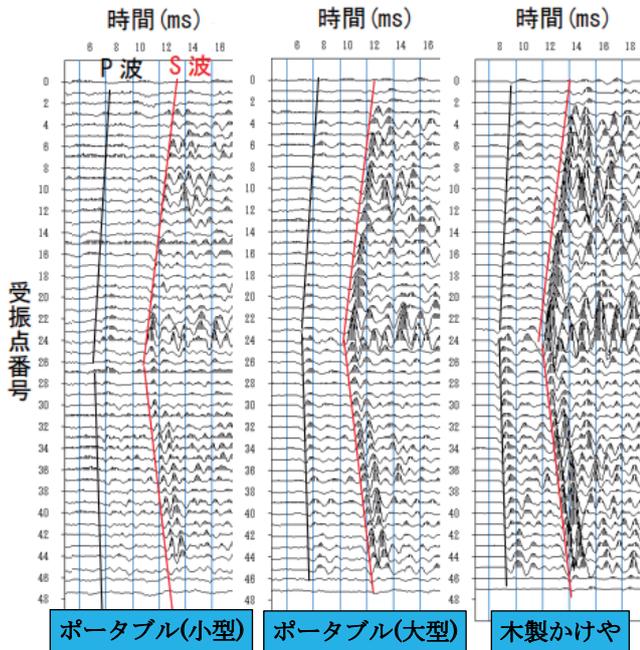


図-3 各振源の記録波形の比較

(3) ポータブル振源の周波数特性

ポータブル振源の地層分解能を決める周波数特性を確認するため、振源近傍でコンクリート面を打撃したときに発生する弾性波（表面波）を加速度センサーで受振し、スペクトル解析を行った。その結果を図-4に示す。卓越周波数は7kHz程度であった。

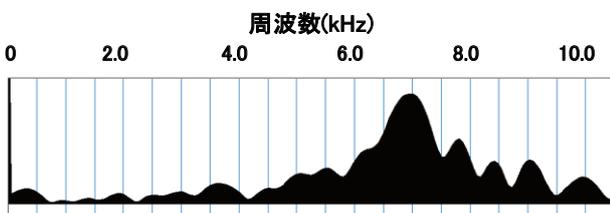


図-4 小型振源の近傍パワースペクトル

次に、大規模ダム調査での適用性を確認するため、監査廊で起振し、コンクリート堤体法面上の振源距離2-4mに設置された、固有周波数40Hz のジオフォンで弾性波（表面波）を受振してスペクトル解析を行った。比較振源は鉄ハンマーとし、それぞれの発振波の周波数特性を確認した結果を図-5に示す。卓越周波数はそれぞれ、小型2.0kHz、大型は1.1kHz、鉄ハンマーは1.5kHz程度であった。コンクリートの場合、弾性波速度は、P波が4.3km/s、S波は2.6km/s程度であるので、小型のポータブル振源を使用すれば、1m程度以下の分解能で探査が可能であることがわかる。

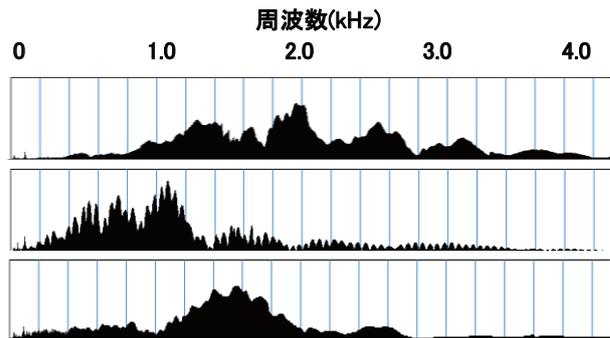


図-5 発振波形のパワースペクトルの比較
 (上:ポータブル(小)、中:ポータブル(大)、下:鉄ハンマー)

4. まとめと今後の展望

コンクリートダム堤体で弾性波の伝搬・透過試験を実施した結果、発振力、周波数特性とも大規模なダムの非破壊調査でも適用可能なことが確かめられた。本振源は、小型軽量で可搬性に優れており、鋼板打撃時の卓越周波数が約50kHzというデータも別の実験で得ている。今後、トンネル覆工コンクリート背面調査の他、鋼矢板の根入れ調査等の非破壊調査での適用性についても検討を進めていく予定である。

謝辞

本稿は、国土交通省の公募研究「平成30年度河川砂防技術研究開発」における「低周波の弾性波を用いたコンクリートダムの亀裂検知および強度分布把握手法の研究開発」の成果の一部である。本研究の共同研究者である東京都立大学の小田義也教授、国立研究開発法人土木研究所の尾西恭亮博士、公益財団法人深田地質研究所の磯真一郎博士、ならびに本研究を進めるにあたりお世話になった国土交通省国土技術政策総合研究所ならびに現地ダム事務所の関係者の皆様に感謝いたします。

<<引用・参考文献>>

- 1) 小田義也・高橋亨・尾西恭亮：弾性波を利用したコンクリートダム堤体の亀裂および強度分布評価手法に関する研究開発－研究開発の概要－、物理探査学会第141回学術講演会論文集、35-36。(2019)

高周波交流電気探査装置を用いた実証実験

日本物理探査（株） ○古賀 遼平, 天野 量稀, 千鳥 雅由
河野 秀紀, 金田 朋之

1. はじめに

日本では 1970 年代までの高度経済成長期に多くの水道管が敷設・普及し、その多くの水道管が法定耐久年数 40 年を超えつつある。しかし、更新が進んでおらず、老朽化に伴う漏水や破損事故が発生している。老朽化の原因の一つに水道管の腐食がある。周囲土壌の比抵抗が腐食に影響を与えることはよく知られている。

弊社は（国研）産業技術総合研究所が開発した技術を提供いただいて高周波交流電気探査装置を製作した。この装置を用いることにより、舗装道路上でも地盤に電極を打ち込むことなく水道管周囲の土壌の比抵抗分布を把握することができる。今回日立市の協力のもと実証実験を行った結果について報告する。

2. 水道管の腐食と比抵抗

ダクタイル鋳鉄管の腐蝕性の指標として、アメリカの国家規格（ANSI / AWWA C105 / A21.5）があり（表-1）、わが国でも腐食に関する標準的な評価指標として用いられている。各項目の評価点の合計が 10 点以上になる場合、対策が必要となる。この中で、比抵抗値は $15 \Omega \cdot m$ 以下で 10 点となり、腐食に対して影響が大きい指標であることがわかる。

表-1 ANSI / AWWA C105 / A21.5 による土壌の腐食性評価基準（比抵抗値単位を $\Omega \cdot cm$ から $\Omega \cdot m$ に修正）¹⁾

調査項目	測定値	評価点数
比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	< 15	10
	15 ~ 18	8
	18 ~ 21	5
	21 ~ 25	2
	25 ~ 30	1
	> 30	0
pH値	0 ~ 2	5
	2 ~ 4	3
	4 ~ 6.5	0
	6.5 ~ 7.5	0
	7.5 ~ 8.5	0
	> 8.5	3
Redox 電位 (mV)	> 100	0
	50 ~ 100	3.5
	0 ~ 50	4
	< 0	5
水分	排水悪く常に湿潤	2
	排水良く一般に湿っている	1
	排水良く一般に乾燥している	0
硫化物	検出	3.5
	痕跡	2
	なし	0

3. 高周波交流電気探査装置について

高周波交流電気探査は、周波数 20kHz 程度の交流による電気探査で、PVA (polyvinyl-alcohol) 超吸水スポンジ製のローラ電極を用いることでアスファルト舗装上でも路面を傷つけずに地下の比抵抗構造を効率よく求めることができる。

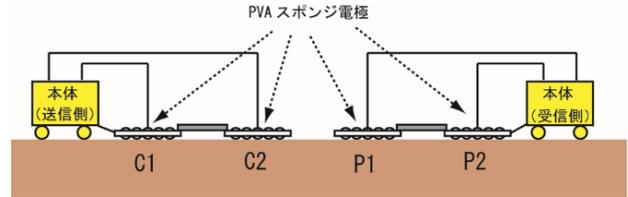


図-1 高周波交流電気探査装置概念図

高周波交流電気探査は、ダイポール・ダイポール法に準拠した測定を行う²⁾。原理は二つの電極間（送信ダイポール）に交流の電流を流すことで地中に発生する電位変化を他の二つの電極（受信ダイポール）で受信する（図2）。この送信・受信ダイポールの位置を変化させることにより、深度方向の比抵抗を取得することができる。基本的には送信ダイポールを固定し、受信ダイポールを移動して測定する（図-3）。

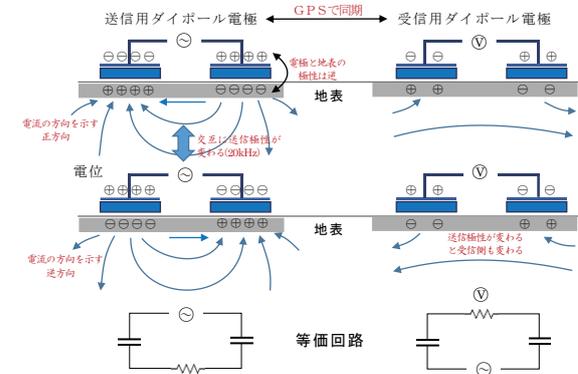


図-2 高周波交流電気探査の原理の概念図

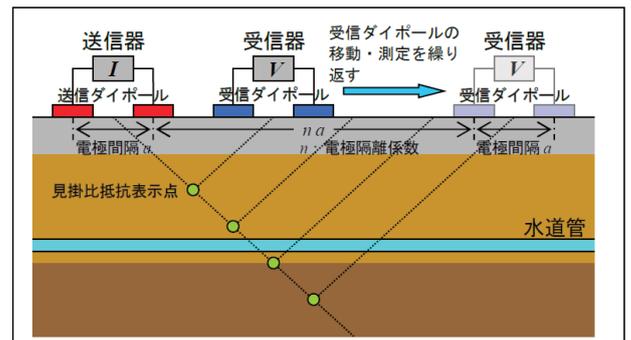


図-3 高周波交流電気探査の測定法

4. 日立市における実証実験

日立市内5か所のアスファルト舗装道路上において高周波交流電気探査による検証実験を実施した(表-2)。従来の電気探査と比較するため④地点において、道路脇の土壌部分において電極打設による直流電気探査を実施した。

表-2 日立市における実証実験内容

地点番号	探査数量		
	探査手法	数量	備考
①	高周波交流電気探査	50m×2測線	令和2年漏水事故
②	高周波交流電気探査	100m×1測線	平成18, 30年漏水事故
③	高周波交流電気探査	100m×1測線	
④	直流比抵抗法電気探査	95m×1測線	平成27年漏水事故
	高周波交流電気探査	100m×1測線	
⑤	高周波交流電気探査	50m×2測線	



図-4 実験場所位置図³⁾

5. 結果

各地点において得られたデータを解析して比抵抗モデルを求めた。例として最もリスク評価点数の高かった②地点の評価比抵抗断面図を示す(図-5)。断面データより、水道管の埋没深度周辺の比抵抗値を抽出して、各側線上にプロットしたグラフを図-6に示した。ANSIによる評価基準をもとに(表-3)、その地点における腐食リスクをランク付けした(表-4)。

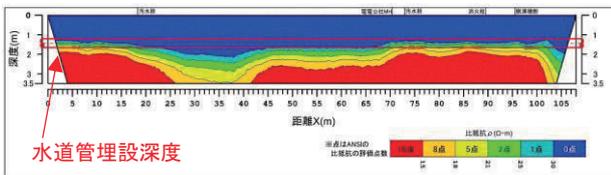


図-5 ②地点のANSI評価比抵抗断面図例

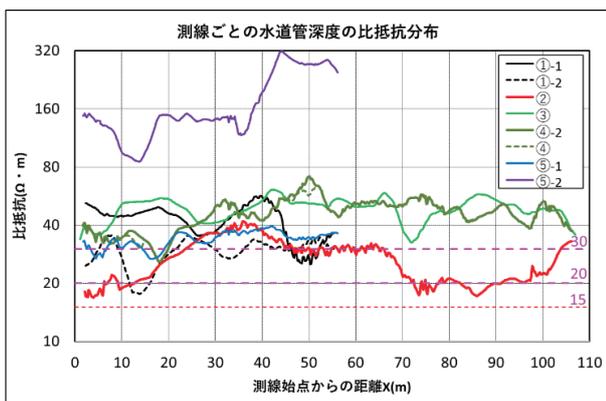


図-6 水道管深度の比抵抗分布

表-3 ANSI基準による腐食リスクランク付け

ランク	概要
A	腐食土壌の分布が懸念され、管の更新・詳細調査の優先箇所。漏水履歴がある場所。比抵抗値が20Ωm未満
B	腐食進行は中位と想定。管の更新・詳細調査の優先度は中位。比抵抗値は20~30Ωm未満
C	腐食は遅いと推定され、管の更新・詳細調査の優先度は低い。比抵抗値は30Ωm程度
D	腐食進行は十分遅い。管の更新・詳細調査の優先度は極低い。比抵抗値は30Ωmより十分大きい。

表-4 各地点における腐食リスクの評価

地点番号	水道管深度の比抵抗		評価
	最低比抵抗値(Ωm)	ANSI評価基準	
①-1	25	1	A
①-2	18	5	
②	17	8	A
③	32	0	C
④	26	1	B
⑤-1	27	1	B
⑤-2	85	0	D

6. まとめ

日立市において、高周波交流電気探査装置の実証実験を実施した。

その結果、舗装路面下の水道管周囲の地盤比抵抗分布を得ることができた。ANSI基準による腐食地盤の評価を行ったが、履歴や地盤状況から判断して、ほぼ妥当な評価ができた。

謝辞

本実験にあたり、日立市企業局様、株式会社管総研様には、実験場所や水道関係の資料をご提供していただいた。ここに深く感謝する。

<<引用・参考文献>>

- 1) 神宮司、狩野、横田(2018):高周波交流電気探査による老朽水道管の更新優先度調査技術,物理探査学会,第138回学術講演会論文集,138, 56 表1より引用
- 2) 千鳥・河野・鈴木・河村・鶴川・狩野・神宮寺(2020):高周波交流電気探査装置を用いた基礎実験,物理探査学会 第143回(2020年度秋季)学術講演会講演論文集,143, 79-82.
- 3) 国土地理院地図(電子国土 Web)
<https://maps.gsi.go.jp/>より作成

濁水中で良質なボアホールカメラ画像を取得するための工夫

株式会社レアックス ○流 喜彦, 狩野 正也, 喜多 淳滋

1. はじめに

地質調査におけるボアホールカメラ観察では、地質構造や割れ目等の性状を明瞭に把握するため、良質な画像の取得が求められる。しかし、観察時に、孔内水が濁っていると孔壁を明瞭に観察できない。そのため、濁水対策を講じる必要があり、一般に清水による孔内洗浄や凝集剤によって細粒分を沈降させる方法が用いられる。しかし、脆弱な地質においては、過剰な洗浄によって孔壁崩壊を誘発するおそれがある。また、孔壁から細粒分が孔内に供給され続ける場合、凝集剤の効果は期待できない。

本稿では、このような課題への具体的な対応策として、①孔壁とのクリアランスを狭めることで濁水の影響を軽減させる器具(以下、『透明アタッチメント』と称す)と、②地上から清水をカメラ部に送ることで濁水を排除させる器具(以下、『送水用アウターケーシング』と称す)を紹介する。

2. 概要

(1) 透明アタッチメント

透明アタッチメントは、孔壁とのクリアランスを狭めるための器具である。この器具をアクリル窓付近に取り付け、内部を清水で満たすことで、濁水の影響を軽減した観察が可能となる(図-1)。

表-1 に透明アタッチメントの特徴を記す。

表-1 透明アタッチメントの特徴

特徴	<ul style="list-style-type: none"> 孔壁とのクリアランスを狭める 適用孔径φ66~100mm程度(サイズ変更可) 材料は安価な透明PVCシート(円筒)とプラスチックカップで容易に作成可能(図-2) 柔軟な部材で構成されるため、孔壁から落下物や突起がある場合でも、形が変形して引っ掛かり等のトラブルを回避しやすい 観察時にボーリングマシンが不要
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 孔壁が広がっていた場合、クリアランスも広がるため効果が低減する



図-1 透明アタッチメント模式図



図-2 透明アタッチメントの部材

(2) 送水用アウターケーシング

送水用アウターケーシングは、地上から送水した清水をアクリル窓直上に供給するための器具である。この器具は、アクリル窓より上部を二重管構造とすることで、清水をアクリル窓直上に供給することができる仕組みとなっている(図-3)。

これにより、事前の孔内洗浄を要せずに、孔壁状況と濁水除去の状況をカメラでモニタリングしながら観察することが可能となる。表-2 に送水用アウターケーシングの特徴を記す。

表-2 送水用アウターケーシングの特徴

特徴	<ul style="list-style-type: none"> アクリル窓直上に清水を供給 適用孔径φ86~120mm程度 洗浄状況をモニタリングして過剰な洗浄による孔壁崩壊を防止 送水量は地上のポンプでコントロール 全てステンレスで構成されるため、プローブ内部の地磁気センサーに影響を及ぼさない
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 送水に必要な水量(約2m³/10m区間)の確保 ボーリングロッドと接続するため、観察時にボーリングマシンが必要



図-3 送水用アウターケーシング模式図

3. 観察事例

(1) 事例 1: 透明アタッチメント

割れ目が多数発達した砂岩で、孔壁が角礫状となっていた。このため、孔壁崩壊のリスクを回避するため、事前洗浄は行わずに観察した。しかし、孔内水の濁りにより孔壁を明瞭に視認できなかったため、透明アタッチメントを装着し、再観察を実施した。

取得画像を比較すると、透明アタッチメントを装着することにより、濁水の影響が軽減されていることが確認できる(図-4)。

(2) 事例 2: 送水用アウターケーシング

粘土化した破砕区間を有する泥岩で、孔壁崩壊のリスクを回避するため事前洗浄は行わずに観察した。しかし、孔内水は顕著な濁水状態にあり、孔壁から細粒分が供給され続けていることが想定された。

そこで、送水用アウターケーシングを装着し再観察を実施した結果、濁水の影響を解消することができ、明瞭な孔壁画像を取得できた(図-5)。

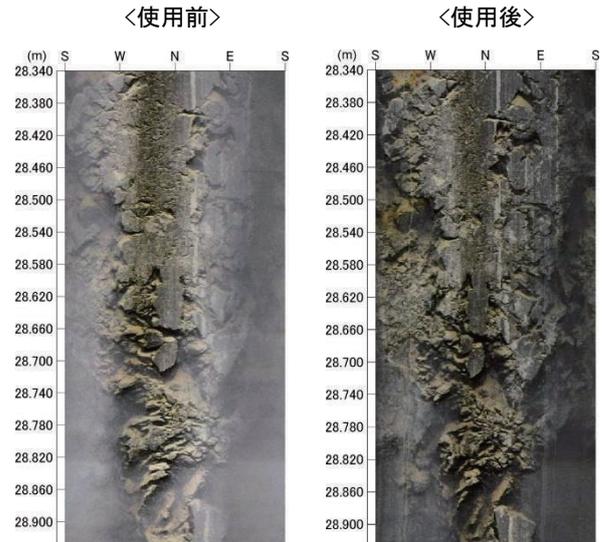


図-4 透明アタッチメントの効果比較(孔壁展開画像)

4. 濁水対策フローと今後の展望

脆弱な地質におけるボアホールカメラ観察では、清水による孔内洗浄や凝集剤を用いる従来の方法では、濁水を解消できないことが度々ある。また、度重なる再洗浄によって孔壁崩壊が生じ、元来の孔壁状態を観察できないことや、修復不能な孔内閉塞を誘発し、観察自体が中止となってしまうこともある。

これらの問題に対して、本稿で紹介した透明アタッチメントや送水用アウターケーシングを濁水の状況に応じて選択し、使用することが問題解決の一助になると考えている。図-6に良質な画像を取得するのに有効な観察手順の一例を示す。

今後は、更なる良質な画像の取得に向けて、濁水対策以外の問題点(孔壁の付着物除去等)にも着目したい。

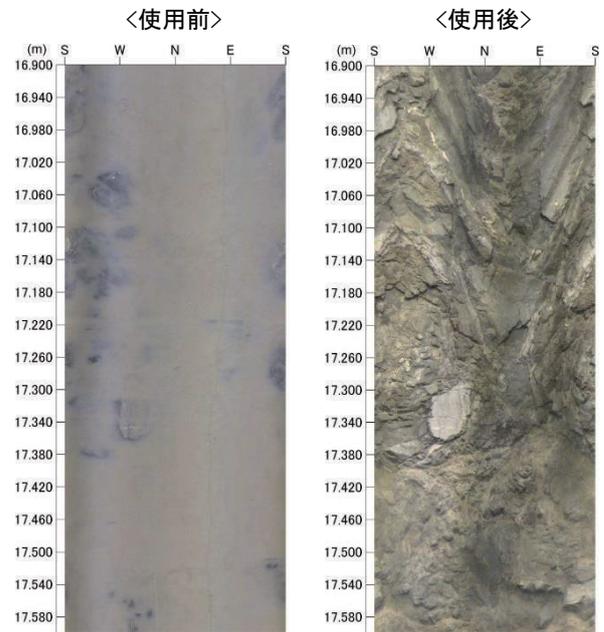


図-5 送水用アウターケーシングの効果比較(孔壁展開画像)

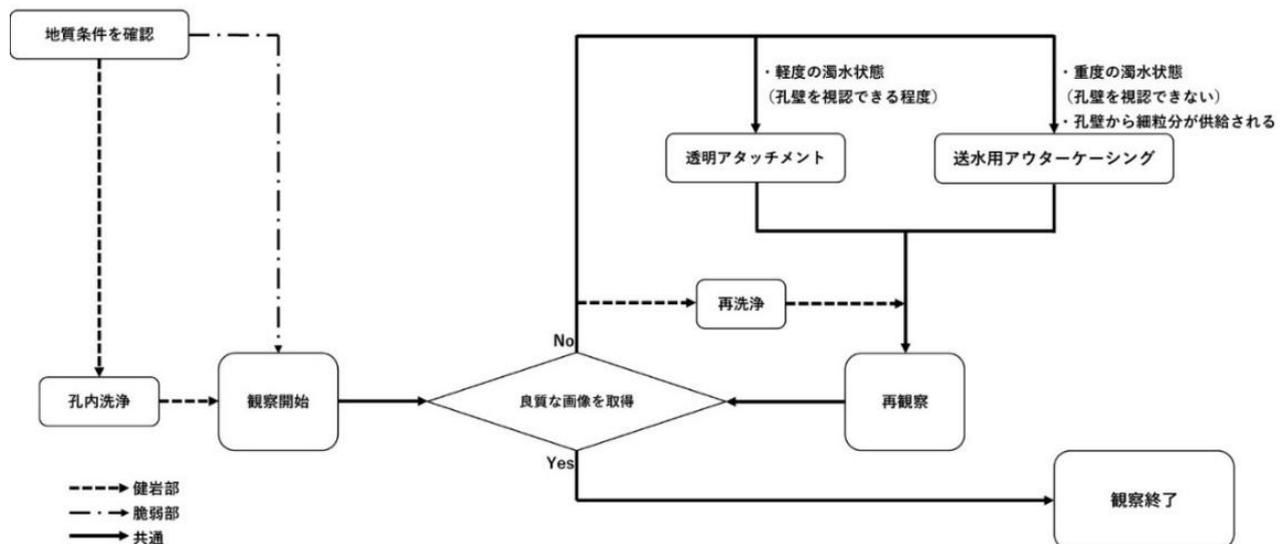


図-6 濁水中の観察フロー一例