



探地雷达探测围堰抛石层厚的正演模拟与工程应用^{*}

刘 强¹, 张盛行², 王承强², 马冬冬³

(1. 江苏连云港港口股份有限公司, 江苏 连云港 222042;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省防汛防旱抢险中心, 江苏 南京 211500)

摘要: 基于有限时域差分法, 对空气-抛石-土层3层介质进行探地雷达正演模拟, 分析雷达波传播过程和典型接收图谱。结果表明, 雷达波在介质中以球面波形式传播, 能量随传播距离逐渐分散, 遇到电学属性不同的界面将产生反射和透射; 根据雷达波反射和同相轴连续特征可推测抛石层与土层交界面, 根据波形反射异常、波形反向、波速变慢可圈定疑似夹泥等软弱异常区, 但多次回波使接收图谱畸变, 易引起误判。将探地雷达应用于实际抛石围堰工程探测并结合钻孔勘测, 探明了抛石层厚分布和抛石体内异常。

关键词: 有限时域差分法; 正演模拟; 探地雷达; 围堰; 工程应用

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0008-06

Forward modeling and engineering application of ground penetrating radar in detecting riprap layer thickness of cofferdam

LIU Qiang¹, ZHANG Sheng-hang², WANG Cheng-qiang², MA Dong-dong³

(1. Jiangsu Lianyungang Port Co., Ltd., Lianyungang 222042, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Flood and Drought Relief Center of Jiangsu Province, Nanjing 211500, China)

Abstract: We carry out the ground penetrating radar forward modeling for three layers of air, cofferdam and silt on the basis of finite difference time domain, and analyze the radar wave propagation process and typical receiving patterns. The results show that the radar wave propagates in the form of spherical wave in the medium, and the energy disperses gradually with the propagation distance. When it encounters the interface with different electrical properties, reflection and transmission will be generated. The interface between the riprap layer and the soil layer can be inferred according to the radar reflection and the continuous characteristics of the in-phase axis, and the weak abnormal areas such as suspected mud impregnation can be delimited according to the abnormal reflection of the waveform, reversal waveform and the slow wave velocity. However, the receiving graph is distorted by multiple echoes, which is easy to cause misjudgment. By applying the ground penetrating radar to the actual riprap cofferdam project and combining with the borehole survey, the distribution of riprap layer thickness and the anomaly in riprap body are found out.

Keywords: finite difference time domain; forward modeling; ground penetrating radar; cofferdam; engineering application

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是利用高频电磁波对地下结构或者物体内部不可见目

标体进行探测定位的一种物探方法, 因具有无损、高效、操作方便、结果直观等优点, 被广泛应用

收稿日期: 2021-07-02

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407102); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y421006、Y421008)

作者简介: 刘强(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水运工程检测及维修加固。

于浅层地质勘察及工程检测领域^[1-3]。抛石围堰是堤坝、码头等临水工程常见的作业形式, 通过爆破挤淤等手段将原淤泥质土进行排挤置换, 并抛入块石等形成围堰, 其块石底层深度(抛石厚度)及形态是判断围堰场稳定性的重要依据^[4-5]。

当前, 对于围堰等抛石工程质量检测常用的方法为钻孔勘探法, 其结果可靠直观, 但成本高、耗时长、采样点有限且为有损检测。利用探地雷达探测抛石围堰已见相关研究, 如宋华等^[6]通过数值模拟和室内模型得出, 探地雷达可有效识别海堤的抛石底界, 并提出相应的修正方法; 朱瑞虎等^[7-8]使用探地雷达对路面设计宽度下方抛石量进行估算。但探地雷达探测围堰抛石厚度在工程中并未得到广泛应用, 主要存在以下技术难点: 1)探测深度深。大部分围堰抛石厚度较深(>20 m), 常规频率的探地雷达设备难以达到该深度探测。2)信号耗散大。围堰因临水内部含水较高, 而水对电磁波的耗散极大, 造成雷达波无法透射, 导致无法辨识有效目标^[9-10]。本文基于有限时域差分法开展了正演模拟, 探讨搭配低频天线的探地雷达在25米级抛石围堰探测中的适用性, 分析雷达波传播过程和反射信号的典型特征, 并结合实际工程中围堰探测应用, 成功探测出围堰的抛石层厚。

1 探测原理

探地雷达是基于电磁波在不同介质中的传播特性探测地下介质的分布情况, 电磁波在介质中的传播满足麦克斯韦方程^[11-12]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\mu \mathbf{H}) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度(V/m); μ 为磁导率(H/m); \mathbf{H} 为磁场强度(A/m); t 为时间(s); ϵ 为介电常数(F/m); σ 为电导率(S/m); ρ 为电荷密度(C/m³)。

式(1)~(4)表明, 磁场与电磁相互转化, 并

且以有限的速度向远处传播, 从而形成了电磁波。电磁波的传播取决于介质的电学属性(电导率 μ 和介电常数 ϵ), 电导率主要影响电磁波的穿透(探测)深度, 在电导率适中的情况下, 介电常数则决定电磁波在该物体中的传播速度。不同的地质体具有不同的电学属性, 当发射天线发射的高频电磁波遇到介电常数不同的界面时会产生反射回波, 根据接收天线接收到反射回波的时间和形式, 能够确定反射界面的距离及推测反射体的性质。对于围堰工程, 由于抛石层与下方土层存在一定的电学属性差异, 在该界面位置出现同相轴连续性较好的信号反射, 接收到的电磁波能量显著增强, 形成强反射界面, 但当介质含水量较高时会严重吸收电磁波能量, 使得反映地下深层的信号强度大幅减小。

2 正演模拟

2.1 有限时域差分法

有限时域差分法(finite difference time domain, FDTD)是一种求解麦克斯韦方程的数值方法, 通过把连续电磁场在时间和空间上进行离散化, 电场分量与磁场分量在时间和空间上相互分离, 将麦克斯韦微分方程转化为差分方程, 该求解方法主要特征见表1^[13-15]。

表1 FDTD 主要特征

离散空间	离散单元	时域离散	求解方式
计算域	结构网格	中心	显式求解
全部离散		差分离散	

本文基于FDTD对大理深抛石围堰进行二维雷达探测正演模拟, 验证探地雷达搭配25 MHz低频天线在抛石围堰探测中的适用性, 分析雷达波的传播特征以及抛石层与土层交界面处典型反射信号, 为现场工程判定提供解译依据。

2.2 正演模型及参数

抛石围堰正演模型见图1。正演模型1从上至下介质分别为空气层、抛石层和土层; 正演模型2则在抛石层中设置了局部的夹泥层。模型平距为40 m(x轴方向), 深度为25 m(y轴方向), 其中块石层厚20 m, 土层厚度为5 m, 边界设置电磁

波吸收层, 网格边长为 0.2 m, 模型相关介质的参数见表 2。正演模拟激励源选用 25 MHz 雷克子波, 其波形与实际应用中探地雷达发射天线上的场源十分接近, 见图 2; 接收器平行于发射源, 位于其右侧 2 m 位置处。模拟过程中, 激励源和接收器沿抛石体与空气边界从左向右完成探测扫描。

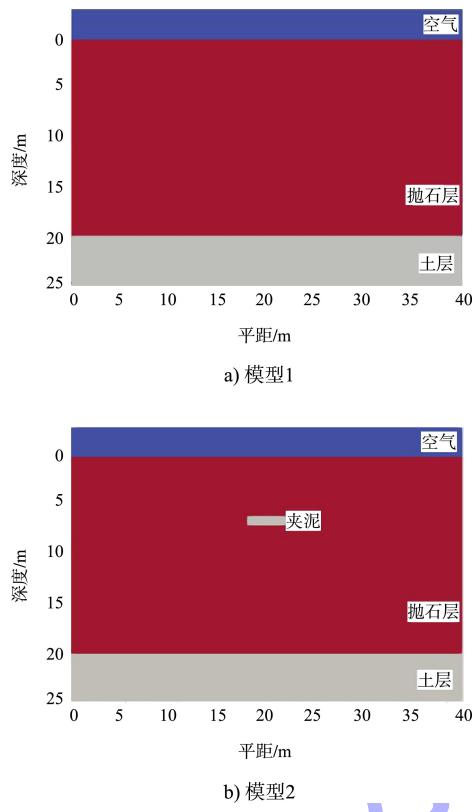


图 1 正演模型

表 2 正演模型介质参数

材料	相对介电常数	电导率/ ($S \cdot m^{-1}$)	磁导率/ ($H \cdot m^{-1}$)	波速/ ($m \cdot ns^{-1}$)
空气	1.0	0	1	0.30
抛石	4.4	3×10^{-4}	1	0.14
土体	33.0	0.1	1	0.05

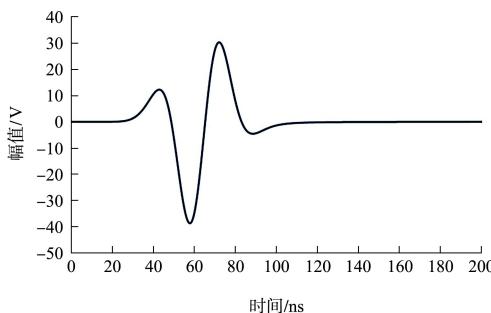
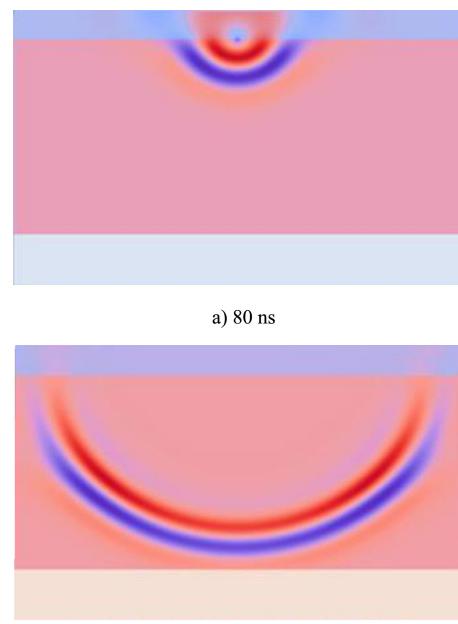


图 2 中心频率 25 MHz 雷克子波时域波形

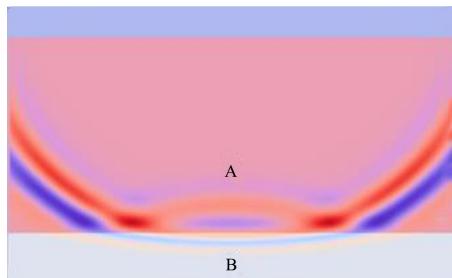
2.3 正演结果分析

2.3.1 波传过程

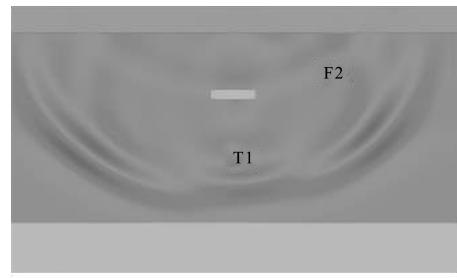
正演模型 1 波传过程见图 3。可以看出, 雷达波从发射源以球面波的形式扩散, 由于抛石体相对介电常数大于空气的相对介电常数, 雷达波在抛石体传播速度小于空气中的传播速度, 故表征为在空气中的扩散半径大于在抛石体中的扩散半径。通过空气传播的雷达波最先到达接收器, 形成首波信号。黑白两色分别表征雷克子波振幅的正负, 颜色深浅表示信号强度, 正演模型中介质均为各向同性, 雷达波在各个方向传播速度和传播能力一致, 故继续以球面波形扩散, 而在实际工况下, 被测介质为离散不均质体, 故在传播过程雷达波将不是规则的球面波形, 会出现提前反射、绕射及畸变, 作为杂波表现在探测图谱中。雷达波接触抛石体与土层交界面时, 由于两介质的电学属性差异, 一部分作为反射波 A 以球面波形式反射回抛石体内, 另一部分作为透射波 B 在土层内传播。对于透射波 B, 一方面由于土层相对介电常数远大于抛石体的相对介电常数, 雷达波在土层的传播速度远小于抛石体中的传播速度, 表现为球面波直径变大、传播速度变缓; 另一方面, 土层电导率远大于抛石体电导率, 电磁波在土层内衰减迅速, 表现为土层电磁波正演信号颜色变浅。反射波 A 到达抛石面时, 接收器将接收此信号。



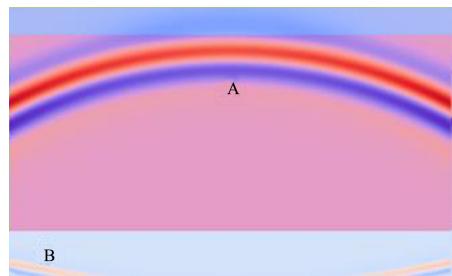
b) 176 ns



c) 212 ns



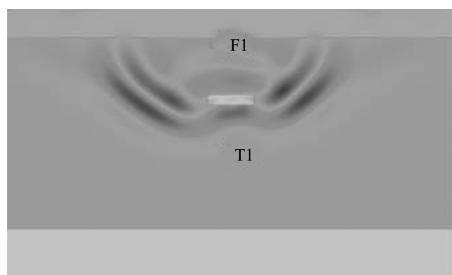
b) 185 ns



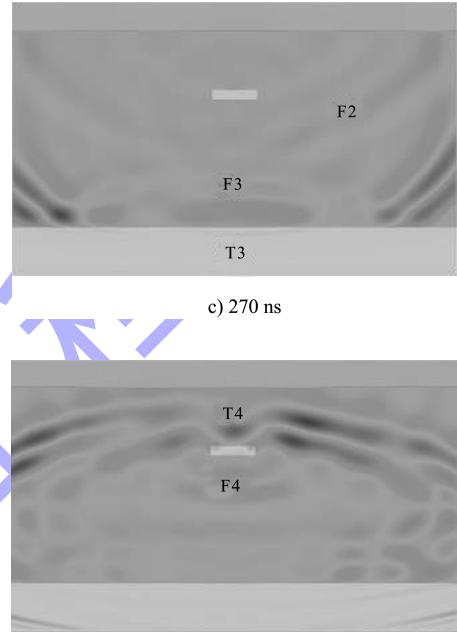
d) 321 ns

图3 正演模型1雷达波快照

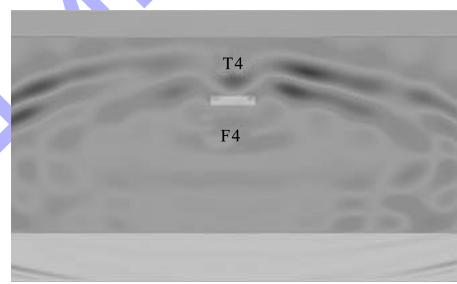
正演模型2在抛石体中设置了局部夹泥, 雷达波在该处将会发生透射、反射, 波传过程见图4。雷达波经过局部夹泥, 产生反射波F1和透射波T1: 反射波F1传至抛石体表面时被接收器接收, 并在抛石体表面(抛石体与空气交界面)又将产生透射波T2和反射波F2; 夹泥体与抛石体存在明显电学属性差异, 透射波T1在夹泥体内表现为明显的波速变低、损耗增大, 故透射波T1和原雷达波相变产生明显滞后, 表现为球形波错断。当雷达波传至抛石体和土层交界面时, 产生反射波F3和透射波F3, 由于穿过夹泥层后产生畸变, 且有多次回波干扰, 故相比而言, 正演模型2的雷达波略为杂乱。反射波F3在夹泥处又将产生透射和折射, 透射波T4传至抛石体表面时被接收器接收。



a) 120 ns



c) 270 ns



d) 320 ns

图4 正演模型2雷达波快照

2.3.2 成图信号

探地雷达最终呈现的图谱为接收器接收到的雷达波信号, 见图5。横轴为步进道次, 纵轴为时间, 图中颜色深浅表示接收到的信号的幅值大小。可以看出, 雷达波自发射源发出, 透过空气层的雷达波率先被接收器接收, 在图像上呈现为表面直达波, 由于收发天线间距小, 能力损耗最弱, 其幅值最大。图5a)中, 图谱底部存在明显的反向反射信号, 为接收器接收到的反射波A, 其形态与抛石体-土体交界面一致, 但其幅值与表面直达波相比大幅减小, 这是由于电磁波在介质中不断衰减导致。图5b)中, 图谱底部同样存在明显的反向反射信号, 但局部略有滞后, 这是由于透射波T4在夹泥区域波速变慢所致; 中部存在明显的反向反射信号, 结合波传过程分析, 该处信号为

接收器接收到的夹泥处的反射波 F1。反向波形可由反射系数计算公式进一步解释, 见式(5)。反射界面两侧介质的介电常数不仅影响反射波的能量强度, 还影响反射波的波形, 当 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 时, 反射系数为负值, 相应的反射波为反相; 反之亦然。当雷达波从抛石体中传播到夹泥层中时, 电磁波是从低介电性介质传播到高介电性介质, 根据雷达波反射系数计算公式, 反射波首波为负波, 因此反射波 F1 表现为与直达波相位相反。

$$R_{12} \approx \frac{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}} \quad (5)$$

式中: R_{12} 为反射系数; ϵ_1 为上层介质介电常数; ϵ_2 为下层介质介电常数。

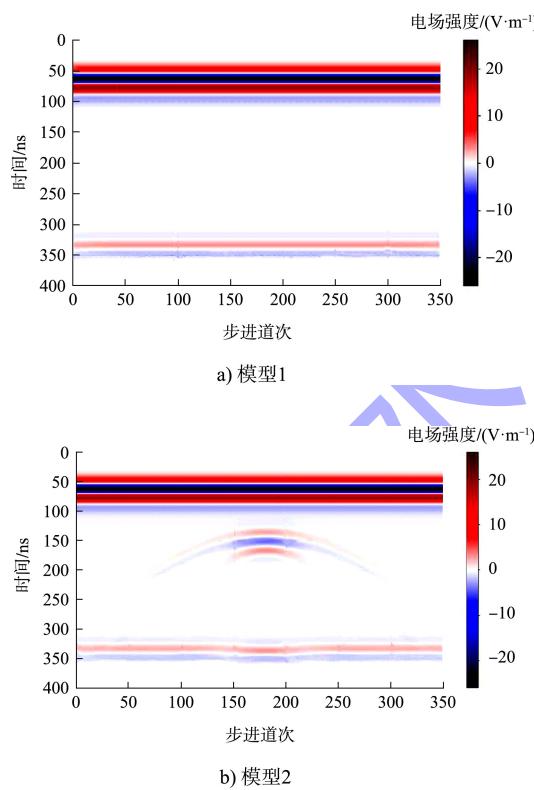


图 5 正演结果

综上, 雷达波在介质中传播时, 以球面波形式扩散, 能量也相应分散, 遇到电学属性不同的界面将产生反射和透射, 由于介质均具有一定电导率, 电磁波信号在传播过程中逐渐衰减。根据雷达波反向反射和同相轴连续特征可推测出抛石层和土层交界面处; 根据同一深度范围内波形幅值突变、波形反向及波速变慢可圈定疑似夹泥等

软弱异常区。由于探测深度较深, 即使是条件较为理想的正演模型, 抛石界面的反射也较弱, 在实际工程中, 工况往往比正演模型复杂得多, 因而在工程探测时应注重对信号的增益调节, 放大深层信号, 必要时须结合钻孔验证。

3 工程应用

连云港某围堰采用爆破挤淤抛石斜坡堤的结构形式, 抛石填料采用 10~100 kg 自然级配开山石, 含泥量小于 10%。根据设计资料, 抛石层厚大致在 20~30 m, 为探明施工后的抛石层厚及分布情况, 采用探地雷达对该围堰进行探测, 并辅以钻孔勘察进行比对验证。仪器及测量参数确定为: 天线中心频率为 25 MHz, 天线收发间距为 2 m, 采样时窗为 400 ns。该围堰某测线长度为 30 m, 并在 15 和 25 m 处进行钻孔勘测。雷达探测图谱见图 6。

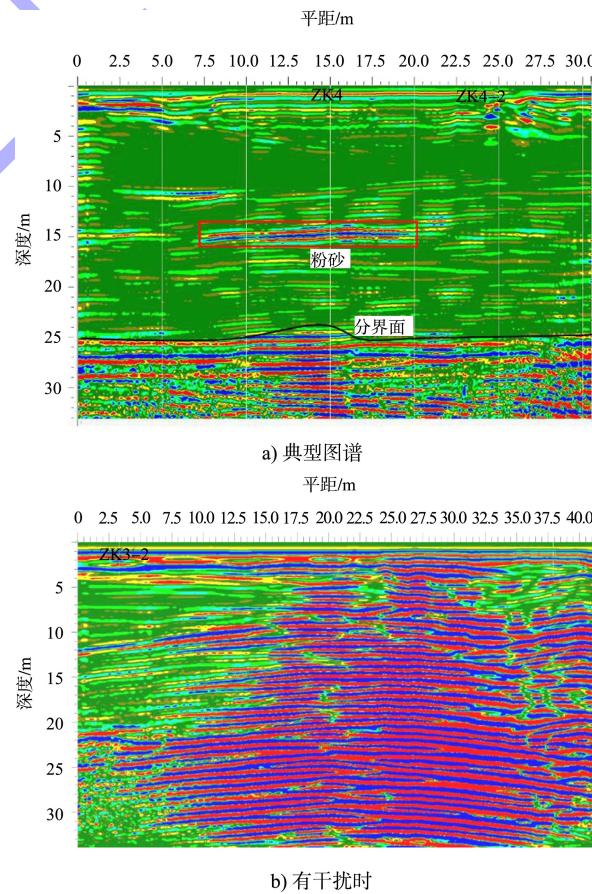


图 6 雷达探测图谱

图 6a) 底部存在同相轴连续的明显反射信号, 推测该强反射区域顶面为块石层与下方土体分交界面, 经钻孔勘测, 块石层厚为 25.6 m, 据此标

定介电常数,以分析全测线探测结果。另外,测线长度7.5~20.0 m、深度14.0~16.0 m范围内存在反映明显的强反射信号,推测该处存在软弱夹层异常。经钻孔勘测,异常区域为粉细砂,深度为14.2~16.2 m,芯样见图7,与物探结果吻合。以5 m为间距取点,探得该测线层厚见表3,该测线钻孔勘探图见图8。当测线周边有铁皮房和门机等呈铁磁性建筑时,将对透过空气层的雷达波产生强反射,并被接收器接收,该测线探地雷达图谱将呈现明显的强反射干扰信号,难以分辨抛石层内反射回的有效信号,如图6b)所示,故应结合现场状况合理安排测线,避开铁磁性物体。

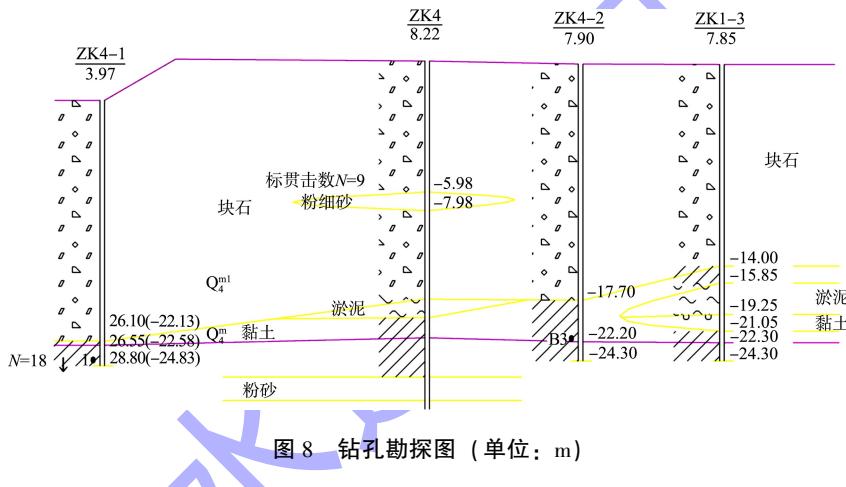


图8 钻孔勘探图(单位: m)

4 结论

1) 雷达波在介质中以球面波形式扩散,能量也相应分散、衰减,当遇到电学属性不同的界面将产生反射和透射。根据雷达波反射和连续特征可推测出抛石层和土层交界面,根据同一深度范围内波形幅值突变、波形反向及波速变慢可圈定疑似夹泥等软弱异常区。

2) 本文中抛石层厚25米级的围堰,采用天线中心频率25 MHz、天线间距2 m、采样时窗400 ns的测试参数,并结合钻孔验证及修正,取得了预期的探测效果。

3) 门机等呈铁磁性的工程设施,对雷达波产生强烈反射干扰,测线布置时应考虑避开;工程现场介质分布不均,多次回波干扰较多,探测图谱较为复杂,须结合钻孔资料进行解译。

表3 推测块石层厚度

水平位置/m	0	5	10	15	20	25
推测块石层厚度/m	25.2	25.5	25.8	25.5	25.8	26.0



图7 钻孔芯样

参考文献:

- [1] 冯德山,王珣,戴前伟.探地雷达数值模拟及程序实现[M].长沙:中南大学出版社,2018.
- [2] 吴丰收.混凝土探测中探地雷达方法技术应用研究[D].长春:吉林大学,2009.
- [3] VAUGHAN C J. Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations[J]. Geophysics, 1986, 51(3): 595-604.
- [4] 张友栋.某大型填海造陆工程数值模拟及仿真应用研究:基于风险防范视角[D].天津:天津理工大学,2019.
- [5] 康志勇,郑晓波.爆炸排淤填石法在青岛港董家口港区青岛港集团矿石码头工程引堤形成中的应用[J].科技传播,2012(5): 127-128.
- [6] 宋华,王立忠.海堤探地雷达探测模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011, 30(S1): 2826-2833.
- [7] 朱瑞虎,郑金海,傅月波.基于地质雷达探测的抛石量计算方法[J].水运工程,2016(11): 25-28.