

基于地质雷达探测技术对水工隧洞溶洞特性的研究

杜燕, 彭世琥

(江西省鄱阳县水利电力勘测设计室, 江西 鄱阳 333100)

摘要: 地下工程一直是施工的难点问题, 地下工程是隐蔽工程, 地下地质环境复杂多变, 而且隧洞工程庞大, 如果不能准确探明地下地质情况, 在施工过程中存在极大的安全隐患. 本文结合实际隧洞工程, 首先通过采用数值分析软件 GprMax2.0 对地质雷达电磁波在溶洞传播特性进行正演分析, 在理论上得出了其电磁波形图; 其次结合现场试验采用地质雷达测试技术对隧道掌子面进行超前地质预报; 最后通过实际开挖进行验证, 建立了相关溶洞地电模型, 得出了地质雷达波在隧洞溶洞中传播的波动特性.

关键词: 水工隧洞; 溶洞; 地质雷达

中图分类号: TV672.1

文献标识码: B

文章编号: 1004-4701(2019)01-0023-05

在地质条件复杂的地区, 由于前期的基础地质勘探不能完全探明隧道内的地质情况, 依靠施工直接揭露的办法具有很大的危险性, 常常发生各种灾害, 如涌水、突泥、突沙、断层破碎带跨塌等, 造成投资增加、人员和施工设备损伤、工期延误等诸多问题, 在施工阶段开展深入细致的地质超前预报工作可有效地避免上述问题的发生. 当前在地质条件复杂地区的大断面水工隧洞愈来愈多, 如何有效地、准确地解决涌水、突泥及断层破碎带的超前预报等已经成为当前大断面水工隧洞施工与控制中亟待解决的系列重要问题之一^[1-4].

本文以在建水工隧洞项目为依托, 针对施工开挖过程中出现的溶洞现象, 通过 GprMax2.0 数值正演分析和现场试验相结合的方法, 对溶洞的相关物理特性进行分析, 最后通过开挖验证的方法进行验证, 得出溶洞的相关波动特性.

1 工程概况

某水库工程是江西省“十三五”重大水利建设计划

项目, 是迄今为止规划建设较大的水利枢纽工程, 本工程分二期实施, 本次设计为第二期工程, 路线起点港排线黄南村水库大坝处, 设计桩号 K8+400, 路线终点港排线排居口村, 设计桩号 K12+600 路线长 4.2km.

勘察区境内谷深坡陡. 线路穿越低山丘陵区后沿松阴溪支流小港溪右岸布设, 河流侵蚀强烈. 矮小植被有灌木林、苔草等. 线路穿越低山丘陵区, 在山前坡麓地带分布第四系残坡积和崩坡积含碎石, 岩石风化较弱, 节理较发育, 岩石较破碎-较完整, 其中召楼村附近受 F1, F2 断裂带影响岩石风化强烈, 节理发育, 岩石破碎.

2 数值正演分析

2.1 模型建立及参数选取

2.1.1 模型建立

采用 GprMax2.0 软件对电磁波遇到断层破碎带反射图像进行正演分析, 第一步要进行隧洞不良地质体模型建立, 其次在对周围环境选取合适的相关参数, 最后进行数值演算^[2,3].

2.1.2 参数选取

为了简化隧洞模型，可以选取研究区域为长方形来代替二维掌子面，根据实际掌子面的大小，综合考虑选取了 4.60m×2.50m 长方形为研究区域进行模拟研究。其中 X 轴对应掌子面的范围 0~4.60m，垂直于隧洞轴线；Y 轴对应隧洞前方围岩 0~2.50m，平行于隧洞轴线；正演分析的不良地质体位于从掌子面由左至右 0.20~4.40m，深度位于掌子面前方 0.10~2.50m。正演分析介质的相关参数设置见表 1。

表 1 常规介质电性参数

介质类型	相对介电常数 ϵ_r	电导率 $\sigma/(\text{ms}\cdot\text{m}^{-1})$
空气	1	0
水	80	0.01~30 000
砂岩(干燥)	3~30	0.01~1
破碎带	5~30	1~5
灰岩	4~8	0.000 000 1
页岩	5~15	1~100
粘土	5~40	2~1 000
花岗岩	4~6	0.01~1
石灰岩(湿)	8	2.5e-2

2.2 数值模拟结果分析

采用 GprMax2.0 软件模拟了地质岩性为石灰岩 3 种岩溶模型：充气溶腔模型、充水溶腔模型、充填泥质溶腔模型(如图 1 所示)；溶腔的半径为 0.50m。模拟采用的天线频率为 400MHz，区域范围为 4.60m×2.50m，模拟网格步长为 $\Delta x=\Delta y=0.01\text{m}$ ，时窗设置为 80ns，采集道数为 88，其中天线发射电磁波的位置为 (0.10,0.05)，天线接收反射波的位置为 (0.20,0.05)，模拟天线探测移动从掌子面左边向右边移动；天线间距为 0.10m，道间距 0.05m。灰岩介电常数设置为 6，其他相关介质的电性参数设置如表 1。

将参数设定好的模型导入 GprMax2.0 软件进行运算，其次把运算好的模拟数据导入编制的 Matlab 软件内，经过验算和增益恢复处理，可得到电磁波遇到不良地质体反射形成的正演分析图像(如图 2)。图 3 为模型正演分析示意图；如图 2 所示，岩溶溶洞电磁反射波的波形呈双曲线形，其弧形顶部的纵坐标表示的是电磁波从掌子面传播到岩溶所花费的

双程旅行时间，均在走时为 15ns 处出现反射波；溶洞的正演图像底界面呈现不同的反射走时，这是由于溶洞中填充了不同的介质所引起的，其中含水溶洞底界面反射走时最长，这是因为电磁波在以水为介质体中传播比较慢，即电磁波在水中传播衰减比较快。从图中还可以发现，在双曲线下面还存在曲率不同的双曲线，且反射效果较第一次弱，这是因为电磁波在掌子面和岩溶溶洞内多次反射形成的结果，但由于能量不断衰减，故发射信号弱；在实际地质预报中，可通过双曲线特征位置来判断空洞里面是否存在充水、充泥或者充气。对准确预报不良地质体岩溶溶洞有很大的作用。

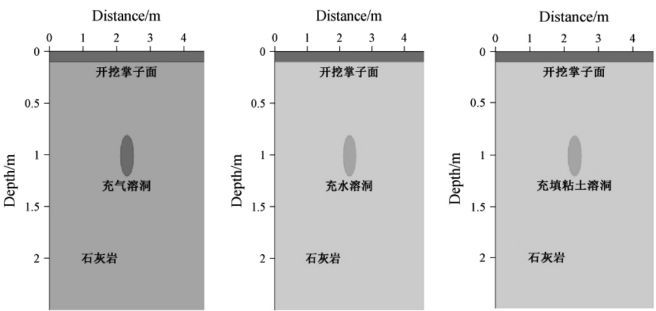


图 1 隧道溶洞模型示意图

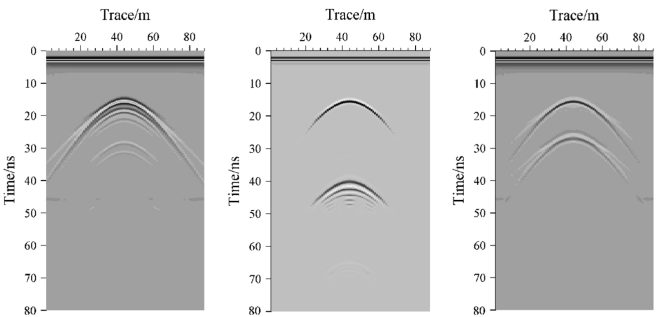


图 2 隧道溶洞 GPR 正演堆积图

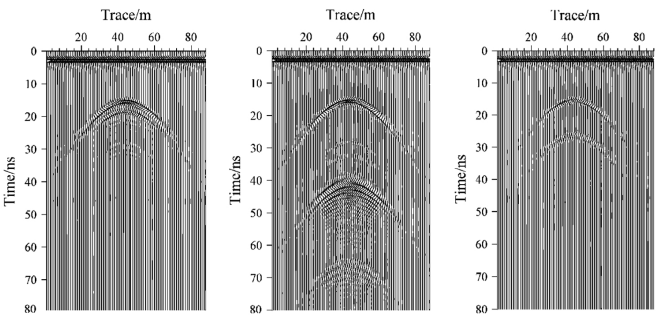


图 3 隧道溶洞 GPR 正演波形图

3 现场试验

3.1 GPR 基本原理

GPR 探测技术是通过天线向地下岩体发射一系列高频脉冲电磁波,电磁波在岩土体介质中传播,遇到介电常数差异的界面,一部分反生反射,另一部分发生透射继续传播;发生反射的电磁波,会被雷达主机接收,并记录电磁波双程旅行时间,根据式 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 求出电磁

波在介质中传播的速度(其中 c 为电磁波的波速,介质体为空气, m/s ; ϵ_r 为相对介电常数,无量纲,其准确值与实际的岩土体种类以及其含水量的情况有关),通过电磁波在岩土体介质双程旅行的时间,最终计算出发射反射界面的位置^[1,4]。如图 4 为地质雷达工作原理。

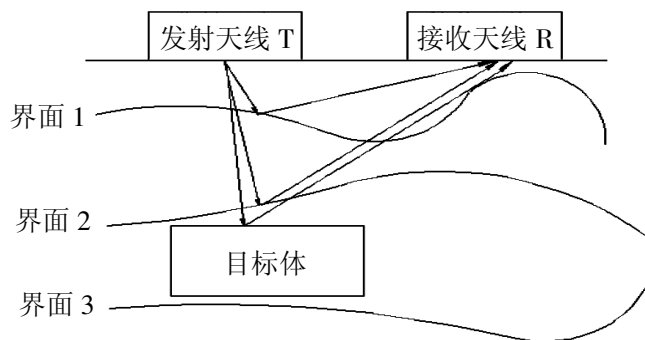


图 4 GPR 工作基本原理

3.2 GPR 在溶洞的应用

3.2.1 完整围岩预报

本次预报范围为里程段 K10+332~K10+362,掌子面里程桩号为 K10+332,掌子面揭露围岩为中风化晶屑凝灰岩,产状 $320^\circ \angle 24^\circ$,岩层厚度约为 20~60mm,层间夹有约 2~3mm 泥质;锤击声哑,无回弹,属中风化,局部为微风化,掌子面未见地下水发育。根据描述可知:掌子面围岩为中风化,局部为弱风化,岩质坚硬,以块状结构为主,岩体较破碎~较完整,结合程度一般,围岩自稳能力一般。

通过解译现场雷达采集的探测数据,并结合现场掌子面地质描述,对掌子面前方 0~30.00m 围岩情况进行预报,预报结果为:掌子面前方 0~2.00m (K10+332~K10+334),电磁反射波振幅较大,同相轴连续性较差,频率较低,是由于受之前围岩爆破开挖造成的松动

区;在里程桩号为 K10+337,掌子面从左至右两米处,电磁发射波反射信号明显,说明该处介质的介电常数差异明显,造成振幅局部增大,同相轴连续性较差,推测此处围岩较破碎,或含水率较大,开挖时应引起注意。里程桩号 K10+342~K10+362,该段反射信号不明显,反射波振幅一般,同相轴连续性一般,说明该段介电常数差异不大,围岩岩性与掌子面相似,岩性以灰岩为主局部存在夹泥,整体呈块状结构,围岩稳定性一般,自稳能力一般。如图 5 为雷达反射波堆积图、图 6 为反射波波形图。

开挖后,在里程桩号 K10+337 处,围岩较破碎,有水渗出;其他未见异常情况,围岩整体呈块状结构,受地质、水文条件影响小,且无地下水流出,雷达探测预报结果与开挖情况基本一致。

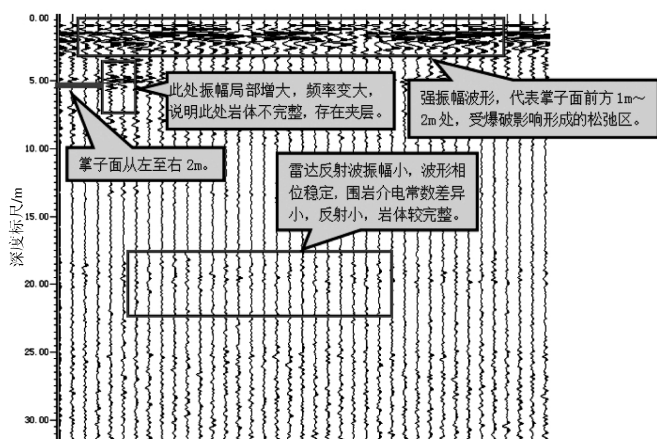


图 5 隧洞 K10+332 处雷达反射波堆积图

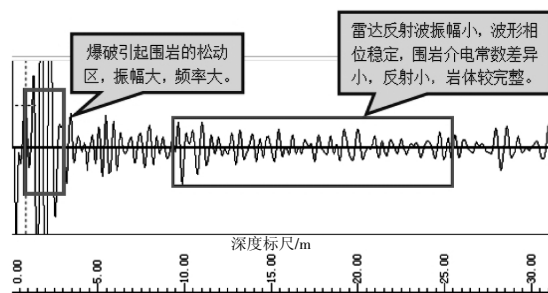


图 6 GPR 反射波波形图

3.2.2 溶洞的预报

本次预报范围为里程段 K10+278~K10+308,根据相关的勘察、设计资料,该段里程桩号处于地质构造断裂处,并且地下水较发育,在前段围岩开挖的时候,掌子面局部有水渗出,围岩整体的稳定性较差,掌子面里

程为 K10+278, 掌子面揭露围岩为强风化灰岩, 产状 $310^{\circ} \angle 18^{\circ}$, 岩层厚度 10~40mm, 属薄层, 锤击可碎, 属强风化, 根据描述可知: 掌子面围岩为强风化, 局部为中风化, 岩质坚硬~较坚硬, 以碎裂状结构为主, 岩体破碎~较破碎, 结合程度差, 围岩自稳能力差。

通过解译现场雷达采集的探测数据, 并结合现场掌子面地质描述, 对掌子面前方 0~30.00m 围岩情况进行预报, 预报结果为: 掌子面前方 0~2.00m (K10+278~K10+280), 电磁反射波振幅较大, 同相轴连续性较差, 频率较低, 是由于受之前围岩爆破开挖造成的松动区, 不是不良地质段引起的反射信号; 掌子面前方 5.00~10.00m (K10+283~K10+288) 反射信号明显, 振幅与相位变化较大, 同相轴连续性较差, 推断该段节理裂隙较发育, 岩体破碎、稳定性差, 围岩水理性差, 遇水易软化、崩解, 掌子面围岩地下水较发育, 开挖时应采用“短进尺、强支护”战略, 保证隧洞开挖安全。里程桩号 K10+293~K10+308, 在这 15m 范围内出现了三组强反射波形, 第一组反射波振幅急剧变大, 频率增大, 同相连续性差, 第二组、第三组反射波振幅、相位、频率比第一组小。推断该出围岩存在不良地质段—溶洞, 三组反射波是由于电磁波在溶洞之间传播形成的多次反射波, 且能力依次衰减; 由于该处地下水较发育, 推测该溶洞富水, 施工开挖应引起注意。为确保安全, 严格控制开挖进尺, 及时支护, 避免围岩长时间暴露引起塌方。如图 7 为雷达反射波堆积图、图 8 为反射波波形图。

开挖后, K10+278~K10+282 围岩情况与掌子面相似, 未见异常情况, 当隧道开挖掘进到里程 K10+283 时, 隧洞围岩情况变差, 节理、裂隙较之前明显增多, 岩体较破碎, 裂隙水较发育, 当里程开挖至 K10+290 时, 隧道出水量增大, 掌子面渗水严重, 节理裂隙增多, 最后发现在 K10+293 发现一溶洞, 预报情况与实际情况一致。

4 结 语

在雷达反射波图形中, 0~2.00m 处会出现振幅较大, 频率较低, 同相轴连续性差的波形, 这是由于掌子面采用钻爆法爆破致使形成的围岩松动区。从最开始的采集数据、地质预报到最后的开挖验证, GPR 在隧洞不良地质体的预报比较准确, 为隧洞安全施工提供了

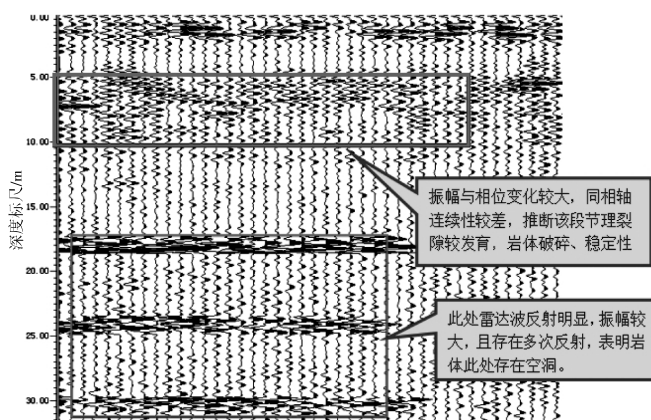


图 7 隧洞 K10+278 处雷达反射波堆积图

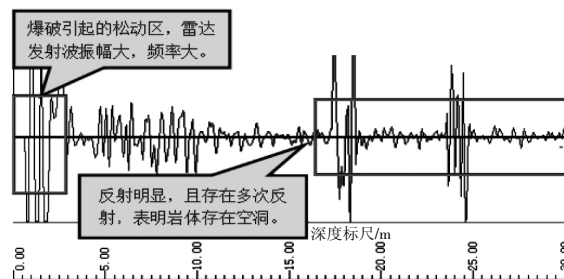


图 8 GPR 反射波波形图

保障, 但是由于隧洞里面环境复杂多变, 且干扰因素较多, 致使有时采集的数据无法对前方围岩进行预判, 严重时误判; 同时解译人员解译数据时, 也要结合现场掌子面的地质情况和相关的地质勘查资料, 这样才能预报准确。通过电磁波的正演模拟分析和不良地质体溶洞的验证, 初步建立起了 GPR 在隧洞溶洞超前地质预报的规律。

参考文献:

- [1] 荣耀, 孙斌, 孙洋. 超前地质预报在隧道围岩动态分级预测中的应用 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (6): 18~23.
- [2] 罗利锐, 刘志刚. 断层对隧道围岩稳定性的影响 [J]. 地质力学学报, 2009 (03): 226~232.
- [3] 周轮, 李术才, 许振浩, 等. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2017, 47 (2): 55~62.
- [4] 陈承申, 冯德山. 探地雷达有限元数值模拟及衰减特性探讨 [J]. 物探化探计算技术, 2014, 36 (2): 152~157.

编辑: 张绍付

Research on fluctuation characteristics of hydraulic tunnels based on geological radar detection technology

DU Yan, PENG Shihu

(Poyang County Water Resources and Electric Power Survey and Design Office of Jiangxi Province, Poyang 333100, China)

Abstract: Underground engineering has always been a difficult problem in construction. Underground engineering is a hidden project. The underground geological environment is complex and variable, and the tunnel engineering is huge. If the underground geological conditions cannot be accurately detected, there is a great potential safety hazard during the construction process. In this paper, combined with the actual tunnel engineering, the numerical analysis software GprMax2.0 is used to carry out the forward analysis of the electromagnetic wave propagation characteristics of the geological radar in the cave, and the electromagnetic waveform diagram is theoretically obtained. Secondly, the geological radar test technology is used in combination with the field test. The tunnel face was advanced for geological prediction, and finally verified by actual excavation. The related cave geoelectric model was established and the relevant fluctuation characteristics of the fracture zone were obtained.

Keywords: Hydraulic tunnel; Cave; Geological radar

翻译: 杜 燕

江西省峡江水利枢纽工程入选 2018 全国有影响力十大水利工程

“中国水利记忆·2018·TOP10”读者评选活动于 2018 年 12 月 19 日—28 日在中国水利网微信公众平台在线进行,评选活动得到水利行业内外的广泛关注和积极参与,投票总数超过 70 万票。江西省重点工程峡江水利枢纽工程入选“激浪杯”2018 有影响力十大水利工程。

峡江水利枢纽工程是国家 172 项重大节水供水工程中首批竣工验收项目。工程总库容 11.87 亿立方米,以防洪、发电、航运为主,兼有灌溉等综合效益。工程总投资 99.22 亿元,工程于 2009 年 9 月奠基,2017 年 12 月竣工验收。自运行以来,工程全面发挥了防洪、发电、航运等综合效益。

2018 年,省峡管局认真落实“水利工程补短板,水利行业强监管”的要求,践行“绿水青山就是金山银山”的理念,开展了标准化管理创建、水文化工程及水利风景区建设,进一步规范了安全生产工作,工程管理环境和管理水平极大提高。12 月 5 日,水利部公布了第十八批国家级水利风景区名单,峡江水利枢纽榜上有名,并在随后召开的水利部水利风景区建设与管理工作会议上得到授牌。12 月 17 日,经水利部安全生产标准化评审委员会审定,授予峡江水利枢纽工程管理局为安全生产标准化一级达标单位,成为江西省首个一级达标的水利工程管理单位。12 月 20 日,峡江水利枢纽工程标准化管理创建工作通过了省水利厅考核组的考核验收,创建的 25 项标准化试点工程均达到一级标准,居全省同类标准化试点工程的前列。12 月 27 日,峡江水利枢纽工程荣获 2017—2018 年度中国水利工程优质(大禹)奖,这是对工程建设管理规范、设计成果优秀、施工技术先进、工程质量优良、运行安全可靠、综合效益显著等优异成绩的充分肯定。

(江西省峡江水利枢纽工程管理局 熊 军)