

Research on Spectral Characteristics of GPR Detection in Limestone Strata With Different Water Content

Zhaoxia Hu Hua Mei Zhenyuan Zheng Junyi Zeng

School of Civil and Architecture Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan, 421002, China

Abstract

The accuracy of geological radar (GPR) prediction of rock mass in front of tunnel engineering is very high, but there are few studies on the spectral characteristics of limestone formations with different water content. This paper introduces the basic principle of GPR and the principle of spectrum analysis. It is analyzed that the influence of water on GPR detection mainly includes increasing the energy loss of electromagnetic wave and increasing the reflection intensity. Then, through the interpretation of the actual detection of 3 kinds of limestone formations with less water content, general water content and more water content, the spectral characteristics such as the change of the main frequency peak, high frequency absorption, energy loss, as well as some quantitative interpretation indicators of the spectral characteristics are obtained. The results obtained by the research can provide reference for the interpretation of similar limestone strata with different water content.

Keywords

geological radar; moisture content; limestone; spectral feature

不同含水率灰岩地层的 GPR 探测频谱特征研究

胡朝霞 梅华 郑振远 曾俊怡

湖南工学院土木与建筑工程学院, 中国·湖南 衡阳 421002

摘要

地质雷达(GPR)对隧道工程前方岩土体的预报准确性非常高,但是对不同含水率灰岩地层的频谱特征研究较少。论文介绍了GPR的基本原理和频谱分析原理,分析了水对GPR探测的影响主要有增大电磁波能量损耗和导致反射强度变大;然后,通过解译实际探测含水率较少、一般和较多的3种灰岩地层情况下,获得了随着含水率增大时其主频峰值、高频吸收、能量损耗等频谱特征变化规律以及频谱特征的一些定量化解译指标。通过研究所获得的成果,为类似灰岩地层含水率不同时解译提供参考。

关键词

地质雷达; 含水率; 灰岩; 频谱特征

1 引言

隧道工程属于隐蔽工程,而由于很多情况下水文地质条件的复杂性,对隧道工程的正常施工会带来很大的风险。根据已有的大量工程实践经验表明,前期的工程地质勘察与实际隧道开挖揭露地质条件,产生差异巨大的情况并非个例,这就导致了在隧道施工过程中,进行准确的超前地质预

报对于降低后期施工风险是非常重要的一项工作^[1,2]。

地质雷达(GPR)的探测具有分辨率非常高、操作灵活方便等特点,因此被广泛地应用于隧道超前地质预报等工程项目中,已经在实际工程中取得了非常多的有效应用^[3-6]。根据GPR探测原理,其波形和频谱特征与岩土体的水文地质环境(岩性、含水率、风化程度等)具有直接相关关系^[1]。但是,目前大部分的研究工作只是根据探测图像进行分析,对于频谱特征的分析却较少;对于岩土体的水文地质环境描述也过于简单,在岩土体含水率不同对频谱特征差异的研究难寻踪迹。

因此,论文依托某实际工程的大量现场GPR探测结果,对3种不同含水率情况下的灰岩地层,分析了频谱与能量的曲线关系,对GPR探测的传播能量耗散、主频大小等进行了较深入研究。

【基金项目】湖南省教育厅科学研究项目(项目编号:22C0616);大学生创新创业训练计划项目(项目编号:202311528017);大学生创新创业训练计划项目(项目编号:S202311528139);湖南工学院科学研究项目(项目编号:HY22032)。

【作者简介】胡朝霞(1987-),男,中国湖南邵阳人,硕士,讲师,从事土木工程防灾减灾研究。

2 GPR 频谱分析原理

2.1 GPR 基本原理

地质雷达 (GPR) 是利用高频、宽带的电磁波在岩土体地层中传播, 遇到各种明显岩土体的地质分界面时, 部分电磁波会反射回来, 被设置的接收器接收到, 通过对其进行时间剖面的解译, 可以间接获取前方的岩土体变化规律信息^[1,7]。

在隧道前方岩土体中, 不同的地质界面、地层性质、地层含水率等地质情况不同时, 电磁波的传播特征会有明显差异, 这就有利于采用 GPR 进行超前地质预报前方岩土体特征。

2.2 GPR 频谱分析原理

GPR 解译岩土体频率是从波形堆积图得出, 但是具体数值大小无法准确获取, 只能通过波长与频率的关系大致确定。在实际探测的岩土体一般性状差异会较大, 这就导致 GPR 波形堆积图中振幅、频率、波形等差异比较大, 所得到的电磁波性质差异性也明显, 则在频谱图中就会表现出很大的差异性。根据能量守恒定理, 能量谱与振幅谱的平方呈正比的关系, 可以获得相应频率与能量之间的曲线关系^[6,7]。通过得到的关系曲线图, 能够获得探测岩土体的具体主频值大小, 而根据一般情况下频率越大岩土体越致密的规律, 所以获得的具体主频值大小能够作为量化解译岩土体性质的指标。

2.3 水对 GPR 探测的影响

GPR 是由传播的电磁波进行探测前方地质体的, 而传播的电磁波是由电场和磁场构成。对于前方岩土体地层, 电场是影响 GPR 探测效果的主要因素。当地下岩土体介质中含水较多时, 水中含有的离子会加快电磁波电荷的传播速度, 从而增大了岩土体的导电性, 使得电导率增大而出现衰减系数增大, 电磁波的能量损耗被吸收增大, 尤其是高频部分损耗明显, 表现为 GPR 传播信号呈现模糊状, 高频较少低频突出^[7]。

当地下岩土体含水率较多时, 其与周围含水率较少岩土体介电常数差异很大, 使得介电常数数值增大, 这也导致 GPR 探测反射波的振幅增大。

3 工程概况

论文所测数据为贵州省某高速公路隧道工程, 全长 7203m, 最大埋深约 524m。隧区位于扬子准地台—黔北台隆—遵义断拱—毕节东北向构造变形区。隧道位于岩孔背斜北翼、高桥向斜南翼。隧道区岩层单斜, 地质构造简单, 岩层产状 $323^{\circ} \sim 22^{\circ} \angle 22^{\circ} \sim 47^{\circ}$ 。岩溶发育形态主要为落水洞、溶洞等, 受岩性和构造限制, 多呈带状和块状出现。隧道主要穿越灰岩寒武系下统清虚洞组灰岩 (ε_{1q}), 地下水位不一, 地下水渗透性亦存在一定差异。

4 不同含水率灰岩地层 GPR 探测频谱特征研究

本次以含水率较少、一般和较多的 3 个不同灰岩地层施工段为对象, 忽略岩体中的少量差异性, 通过对工程现场实际预报数据进行解译, 并根据现场开挖揭露岩土体含水率情况, 进行分析其主频峰值、高频吸收、能量损耗等频谱特征变化规律, 获得了频谱特征的一些量化解译指标。

4.1 含水率较少灰岩地层 GPR 频谱特征分析

对于岩溶地区含水率较少的灰岩地层, GPR 信号的能量和频率的特征曲线图如图 1 所示。由图中可知, 频率较高部分信号的能量较高, 表明电磁波在含水率较少的灰岩地层中传播时, 高频信号部分的损失是比较小, 其能量就会出现较高的情况, 也就是其反射波的能量损失也较小。电磁波在含水率不高的灰岩地层中传播过程中, 由于灰岩地层强度不算太低, 其能量和频率被吸收损失较少, 尤其是高频部分的吸收损失很少。这种水文地质情况下, 具有相对较高的主频值, 根据图 1 的 GPR 频谱图, 可以得出峰值主频为 46MHz, 该主频值可为以后进行同类型含水率较少灰岩地层解译提供参考。

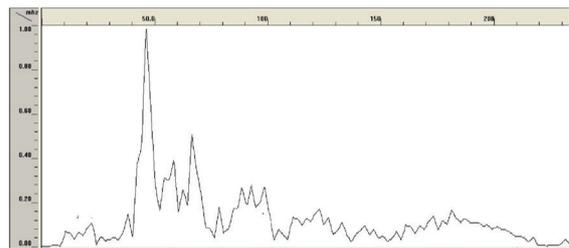


图 1 含水率较少灰岩 GPR 频谱图

4.2 含水率适中灰岩地层 GPR 频谱特征分析

对于岩溶地区含水率适中的灰岩地层, GPR 信号的能量和频率的特征曲线图如图 2 所示。由图中可知, 频率较高部分的信号能量较低, 这表明电磁波在含水率适度增加的灰岩地层中传播时, 高频信号部分的损失会明显增加, 其能量就会出现较低的情况, 其反射波的能量损失会较大。电磁波在含水率较多的灰岩地层中传播过程中, 其能量和频率被吸收增多, 尤其是高频部分的吸收损失明显减少。这种水文地质情况下, GPR 的主频值会有所降低, 根据图 2 的 GPR 频谱图, 可以得出峰值主频约为 26MHz, 该主频值为类似灰岩地层含水率适中情况下的解译提供参考。

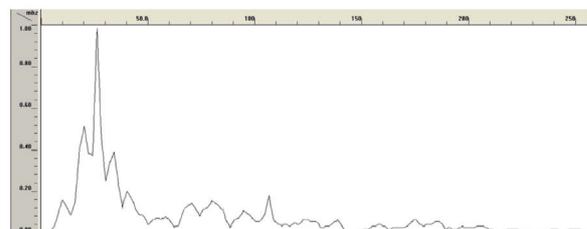


图 2 含水率适中灰岩 GPR 频谱图

4.3 含水率较多灰岩地层 GPR 频谱特征分析

对于岩溶地区含水率较多的灰岩地层，GPR 信号的能量和频率的特征曲线图如图 3 所示。由图中可知，频率较高部分的能量非常低，表明电磁波在含水率较多的灰岩地层中传播时，高频部分损失很大，其能量就会出现很低的情况，因此其反射波的能量损失也是很大。电磁波在含水率非常高的灰岩地层中传播过程中，其能量和频率会被水吸收损失很多，尤其是高频电磁波部分吸收更多。这种水文地质情况下，GPR 的主频值会进一步降低，根据图 3 的 GPR 频谱图，可以得出峰值主频约为 13MHz，该主频值为类似含水率较多灰岩地层情况下的解译提供参考。

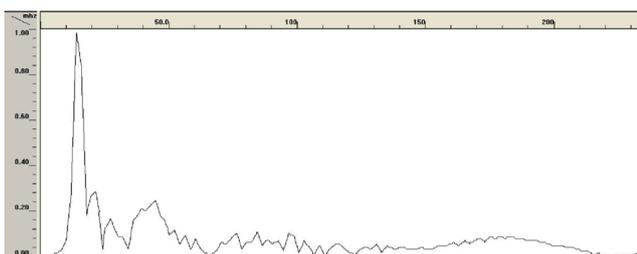


图 3 含水率较多灰岩 GPR 频谱图

4.4 不同含水率灰岩地层 GPR 频谱曲线对比分析

由图 1 至图 3 可以看出，随着灰岩地层含水率的增大，GPR 的峰值主频呈现迅速减小趋势，主频范围也呈减小趋势，较小峰值越来越少且值也呈减小趋势。同时，随着灰岩地层含水率的增大，GPR 频谱与能量曲线的面积呈现减少的趋势，高频能量减小，主频范围能量也呈减小趋势。通过测算，含水率较少、一般和较多灰岩地层中高频能量占比分别为 28.9%、24.1% 和 27.4%，高频能量占曲线整体范围的比例变化不大，表明高频能量损耗的同时低频能量也有明

显损耗，只是与含水率较少时候相比高频能量损耗率明显增大。

5 研究结论

论文分析其频谱特征得出如下结论：

①岩土体的频谱特征与含水率有直接关系，在 GPR 探测解译时，不可忽视地层含水率的影响。

②对于含水率较多、一般和较少的地层中，其主频峰值分别为 46MHz、26MHz 和 13MHz，呈明显的降低趋势，主频范围也呈减小趋势，较小峰值也是减小趋势且数值越来越小。

③对于含水率较多、一般和较少的地层中，高频能量呈减小趋势，但高频能量占整体比率变化不大，只是与含水率较少时相比高频能量损耗率明显增大。

参考文献

- [1] 吴霞,温世儒,晏长根,等.不同风化程度灰岩的地质雷达波形与频谱特征研究[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(6):159-164.
- [2] 王雁南.地质雷达在岩溶地区超前地质预报中的应用[J].工程技术研究,2021(6):48-50.
- [3] 闭遗山,梁明.地质雷达在华南某工地岩溶勘察中的应用效果分析[J].工程地球物理学报,2021,18(1):75-81.
- [4] 吕高,李宁,马旭东,等.灰岩隧洞围岩结构面空间位置及填充物 FDTD 正演[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1065-1070.
- [5] 李俊杰,张红纲,王伟,等.综合物探技术在灰岩地区隧洞超前预报中的应用[J].地质与勘探,2019,55(6):1452-1462.
- [6] 韦猛,蒋勇,袁晨瀚.基于 GPR 频谱分析的隧道空溶洞解译特征研究[J].煤矿安全,2019,50(2):38-42+47.
- [7] 刘东坤.岩溶不良地质灾害体 GPR 量化及正演模拟分析[D].成都:成都理工大学,2014.