

隧道施工中的地质灾害——断层破碎带地质雷达数值模拟研究与应用

戴世鑫, 李祥

湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭, 411201

关键词: 地质雷达; 数值模拟; 断层破碎带

随着国内基建工程迅速发展, 在隧道施工过程中常常会碰到断层破碎带、岩溶、富水体等不良地质体, 给隧道施工带来极大困难(葛颜慧等, 2010; 周东等, 2023)。2019 年 11 月 28 日, 在云凤高速公路第二合同段安石隧道口出现突泥涌水, 导致现场 13 名施工人员被困。2021 年 7 月 15 日, 珠海市香洲区的兴业快线南段石景山隧道掌子面拱顶坍塌, 诱发透水事故, 造成 14 人死亡。因此, 在隧道施工前需要查清掌子面前方地质信息, 确保现场施工人员安全以及财产损失。目前常用的隧道探测方法有 TSP 弹性波法、瞬变电磁法、地质雷达法等超前预报方法(杜俊等, 2022)。其中地质雷达法操作简单、探测速度快、分辨率高, 对围岩异常变化较为敏感, 可以详细的探测掌子面前方地质体。刘常昊等(2022)提前模拟隧道典型不良地质体, 总结雷达波图像, 最后成功预判隧道掌子面前方不良地质体。蒋建国等(2019)结合地质雷达数值模拟图像结果特征, 成功预判掌子面前方断层富水带。本文通过地质雷达数值模拟研究不同断层倾角及填充物发生变化时, 断层破碎带雷达图像变化特征, 从而指导现场地质雷达工作者解译图像。结合蒙西华中铁路三荆段核桃园隧道现场地质雷达探测实例, 预报掌子面前方断层破碎带。

1 地质雷达探测原理

1.1 地质雷达探测原理

地质雷达是通过连续扫描电磁波反射曲线叠加, 利用电磁波探测隧道掌子面信号差异, 判断前

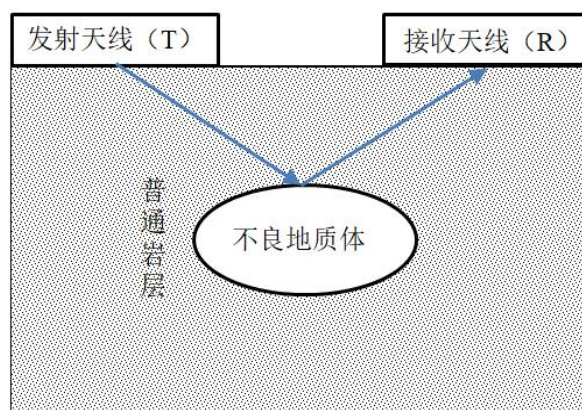


图 1 地质雷达探测示意图

方地质异常(史付生等, 2003)。通过发射天线(T)探测不良地质体, 接收天线(R)接收信号, 地质雷达探测如图 1 所示。

1.2 地质雷达探测不良地质体可行性分析

地质雷达法是利用电磁波探测, 依据反射系数判断反射体属性(龚俊等, 2022)。反射系数和电磁波传播速度有关, 电磁波传播的速度由介电常数和磁导率决定。所以介质电磁属性差异越大, 电磁波衰减越快, 雷达反射信号越明显。电磁波反射系数公式可以简写如下式:

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

式中, ϵ_1 和 ϵ_2 表示上层、下层介质介电常数。根据上下介质介电常数不同, 推算出不良地质具体位置。表 1 为常见介质介电参数表。

2 断层破碎带数值模拟研究

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 51804112)的成果。

收稿日期: 2023-04-10; 改回日期: 2023-04-30; 责任编辑: 潘静。DOI: 10.16509/j.georeview.2023.s1.232

作者简介: 戴世鑫, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质、地球物理勘探研究; Email: hnkjdsx@126.com。通讯作者: 李祥, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事地质灾害方向的研究; Email: 1449674130@qq.com。

表 1 常见介质介电参数表

材质	相对介电常数 ϵ_r	电导率 $\sigma/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	衰减系数 $\alpha/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$
水	81	0.01	—
淤泥	5~30	0.001~0.1	0.07×10^9
空气	1.00	—	—
水	81.00	0.01	—

地质雷达法能够探测出不良地质类型和埋深，但无法准确探测不良地质体具体形态（王锦标等，2020；张湘桂等，2021）。为了更好的研究围岩断层破碎带倾角变化特征，本文利用 GprMax 结合 Matlab 软件，针对隧道内存在的潜在断层破碎带，建立对应的不良体模型进行数值模拟，得到对应的地质雷达图像，总结对应的图像规律，为雷达探测者解译图像提供理论基础。

2.1 不同倾角断层破碎带模拟研究

本文建立如图 2 所示的地层构造模型，模型大小设置为：5 m×3 m，顶部留置 0.2 m 空气层，普通围岩介质大小为 5 m×4.8 m，断层破碎带大小设置 2 m×0.3 m。设置普通围岩介电常数为 6，电导率为雷

达数值模拟共采集 64 道雷达信号，经过 GprMax 和 0.01 s/m，断层破碎带介电常数为 8，电导率为 0.05 s/m。设置水平倾角为 0°、10°、20°、30°断层破碎带，Matlab 软件处理后，模拟结果如下图所示。

通过分析图 2 模拟结果，断层破碎带反射波呈现出曲直线特征。随着断层倾角增加，反射波曲线变化幅度越大、越倾斜，反射波波能量变弱。当倾角为 30°时断层破碎带反射波倾斜最明显，倾角断层破碎带反射波倾斜走向与实际模型断层倾斜方向一致。并且在倾角为 0°、10°、20°、30°的断层破碎带中，发现模拟图像存在相互交叉的散射波和绕射，会对图像解译造成一定干扰。

2.2 不同填充体断层破碎带模拟

隧道地质条件往往非常复杂，为了更加符合实际现场情况，在 5 m×3 m 地质构造模型中建立含有填充体的断层破碎带模型。该模型采用上下三角形为断层破碎带，直角边为 2 m、高为 0.2 m，中间采用长方形作为填充体大小为 2 m×0.1 m，设置埋深为 1.75 m 的断层破碎带。为了更好的研究不同介电常数下断层带模拟结果，通过改变填充物相对电导率和介电常数来实现空洞、淤泥、富水体模拟，实现不同的模拟效果（图 3）。

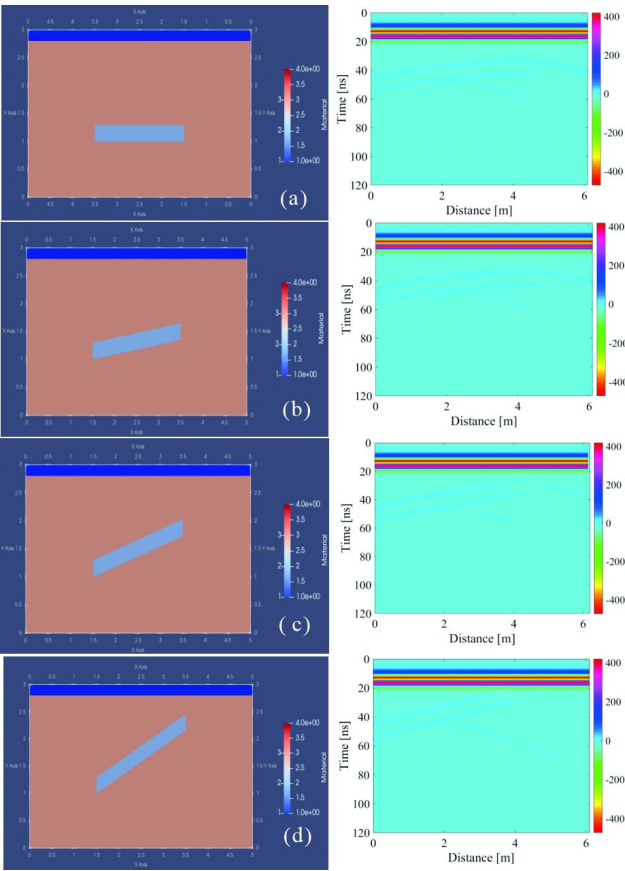


图 2 不同倾角断层破碎带模拟结果：(a) 断层倾角为 0°；(b) 断层倾角为 10°；(c) 断层倾角为 20°；(d) 断层倾角为 30°

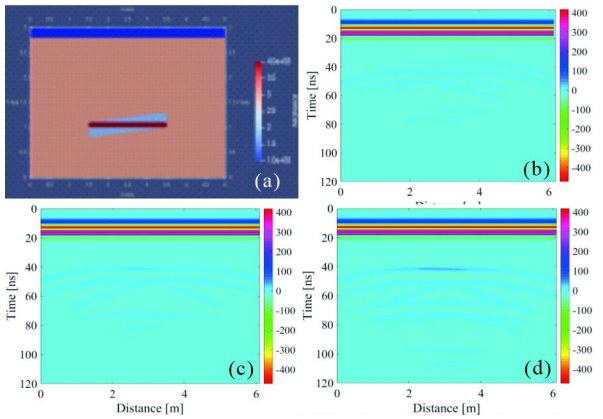


图 3 不同填充断层破碎带模拟结果：(a) 断层破碎带模型；(b) 空洞断层破碎带；(c) 淤泥断层破碎带；(d) 富水体破碎带

图 3 是空洞、淤泥、富水体三种不同充填情况下的雷达模拟结果图。发现不同填充物断层破碎带反射波形杂乱、连续性差，变化幅度较大。其中富水体断层破碎带反射波能量团最明显，这是由于和周围介电常数差异大，反射信号越明显，容易被识别。说明了不同的介电差异对地质雷达探测影响很大。如果断层填充物为空洞低介质常数，会导致雷

达探测信号弱, 探测效果差, 难以准确预报空洞断层破碎带具体类型。

3 预报实例

3.1 工程概况

研究区域依托蒙西华中铁路三荆段核桃园隧道超前地质预报工作, 起迄里程为 DK817+849~DK819+229 全长 1380 m。隧道最大埋深约 214 m, 隧址为丘陵地貌, 地形起伏大, 沟谷狭长, 多呈“V”字型, 隧道采用单洞双线隧道形式。

经过现场勘查, 隧道内围岩以弱风化页岩为主, 局部黄色, 其中有条夹层长石呈灰黑色。节理裂隙较发育, 掌子面较破碎。掌子面无水, 锤击围岩声音略清脆, 较难击碎, 为硬岩。

3.2 地质雷达探测及结论

根据现场探测目标性质, 地质雷达选择 100 MHz 天线进行探测, 设置探测距离为 30 m。现场雷达采用点测方式进行, 点测距离为 0.2 m, 记录时窗设置为 610 ns, 32 次叠加。通过现场采集数据, 最后利用 IDSP6 软件处理数据, 最后得到图 4 雷达波形图。

由图 4 可知, 雷达波出现曲直线信号, 且呈现出一定的倾角, 和断层破碎带数值模拟结果图像特征类似。该段电磁波反射信号变化比较快, 同相轴时断时续, 波形较乱, 信号振幅较强且多次。推测该段围岩较破碎, 节理裂隙较发育, 存在倾角断层破碎带。经过现场掌子面开挖揭露, 成功预判掌子面前方断层破碎带 (图 5)。

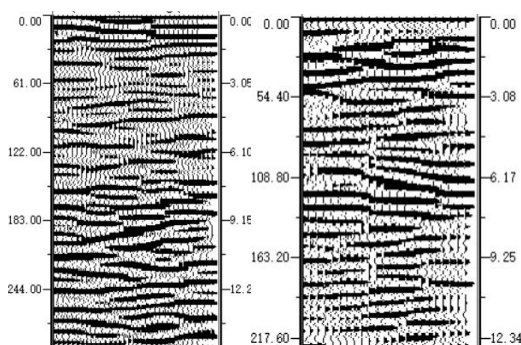


图 4 现场雷达采集波形图

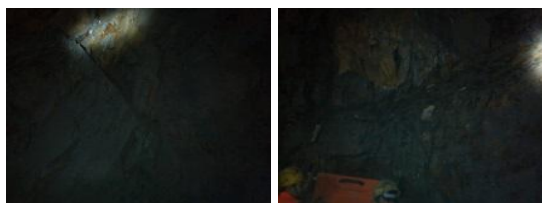


图 5 掌子面开挖揭露的断层

4 结论

(1) 通过现场地质雷达探测和开挖结果, 与地质雷达数值模拟结果符合, 验证了地质雷达数值模拟的可行性。利用地质雷达数值模拟, 可以有效的提前预判不良地质体具体类别、位置、走向等特征, 拓宽了地质雷达图像解译途径, 更好的指导现场雷达探测者对不良地质体图像解译, 提高预报的准确率。

(2) 通过建立断层填充体为空洞、淤泥、富水体三种典型不良体模型, 分析异常体的图像特征和规律, 提高了解译雷达图像的准确性, 为雷达探测者解译地质雷达图像提供理论基础。

(3) 运用地质雷达法在蒙西华中铁路三荆段核桃园隧道探测, 结合地质雷达断层破碎带数值模拟图像特征, 成功预判出隧道内断层破碎带, 有效避免地质灾害的发生, 保障现场施工人员的安全。

参考文献/References

- 杜俊, 廖健都, 韩成力. 2022. 调水工程富水破碎洞段综合超前地质预报技术. 长江科学院院报, 39(12): 15~20.
- 葛颜慧, 李术才, 张庆松, 李利平, 刘斌. 2010. 基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究. 岩土工程学报, 32(7): 1124~1130.
- 龚俊. 2022. 高密度-地质雷达综合法在探测地下不良地质体中的应用. 科技创新与应用, 12(34): 158~161.
- 蒋建国, 刘程, 陈媛, 刘孙光. 2019. 地质雷达正演模拟及在断层富水带超前地质预报的应用研究. 铁道科学与工程学报, 6(11): 2801~2808.
- 刘常昊, 郑万波, 吴燕清, 杨志全, 丁力生, 杨黎明, 史耀轩. 2022. 玉磨铁路景寨隧道富水段涌水量预测方法. 安全与环境工程, 29(4): 66~73.
- 史付生, 张宇, 崔刚. 2003. 相干波理论在地质雷达隧道衬砌检测中的应用. 中国矿业大学学报, (1): 60~62.
- 王锦标, 张志勇. 2020. 隧道衬砌典型结构与缺陷的地质雷达图像特征分析. 工程地球物理学报, 17(1): 112~118.
- 张湘桂, 邹明, 刘宗辉, 唐甫, 蓝日彦. 2021. 隧道衬砌后方隐伏洞穴地质雷达响应特征分析. 地下空间与工程学报, 17(5): 1598~1605.
- 周东, 刘毛毛, 刘宗辉, 王业田, 孙伟杰. 2023. 基于探地雷达属性分析的隧道内溶洞三维可视化研究. 岩土工程学报, 45(2): 310~317+442.

DAI Shixin, LI Xiang: Geological hazards in tunnel construction—Research and application of geological radar numerical simulation in fault fracture zone

Keywords: geological radar; numerical simulation; fault fracture zone