

基于随机分布的断裂破碎带 GPR 剖面特征分析

胡绕^{1,2}, 吴健生², 赵永辉²

(1. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200002 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092)

摘要: 为了验证探地雷达在查找基岩中断裂破碎带的有效性、以及进一步认识破碎带在探地雷达反射剖面上的表现特征, 结合概率论和数理统计知识, 通过设置断裂破碎带中介质的介电常数在一定空间范围内随机分布, 建立了更为贴合实际的断裂破碎带模型, 使用时域有限差分方法正演模拟其二维 GPR 反射剖面, 较好地揭示了断裂破碎带的 GPR 剖面特征。通过对不同破碎程度和基岩具有不同介电常数的破碎带模型进行正演模拟, 分析其正演 GPR 剖面的图像差异, 较为深入地认识了断裂破碎带在 GPR 剖面上反映出的特征。最后, 进一步引入工程实例, 发现通过正演模拟揭示的断裂破碎带 GPR 剖面特征在断裂破碎带的实际探测剖面上也是存在的, 说明通过正演模拟来指导实际资料的解释是现实可靠的。

关键词: 探地雷达, 断裂破碎带, 正演模拟, 时域有限差分

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2006)06-0551-03

在基岩面不太深的地区, 高层建筑的基础一般以基岩作为持力层, 详细了解基岩中破碎带的发育情况对工程安全具有重大意义。对于破碎带相对发育的地区, 单纯依靠工程钻探显然是不能满足工程设计的要求, 此时, 工程勘察通常结合钻探, 使用探地雷达来探测基岩面的起伏形态和破碎带的分布。

由于受到挤压剪切力的作用, 断裂破碎带上岩石的结构发生了很大的变化, 岩石的内在联系受到破坏, 常呈糜棱状, 破碎带上岩石含水率和矿化度都发生了变化, 从而使破碎带中介质的介电常数与围岩有了较大的差异, 通常在围岩的介电常数与水的介电常数之间分布。

为了验证探地雷达在查找基岩中断裂破碎带的有效性, 以及进一步认识破碎带在雷达剖面上显示出的特征, 笔者结合刘光鼎院士提出的综合地质地球物理研究原则中正演与反演相结合的思想^[1], 从建立合适的断裂破碎带模型入手, 使用时域有限差分方法正演模拟断裂破碎带模型的 GPR 剖面记录, 分析、总结其呈现在 GPR 剖面上的特征, 为实测雷达剖面资料解释提供依据。

1 断裂破碎带模型的建立

在利用时域有限差分方法对地下电性结构的 GPR 剖面记录正演模拟时, 为了得到质量较好的 GPR 正演剖面, 从而比较全面地反映地下电性结构

在 GPR 剖面上的特征, 重要的前提条件就是合适模型的抽象。通过对模拟的地下电性结构进行合理、有效的抽象, 建立更为贴合实际、反映其电性特征的数值模型至为关键。

笔者通过对断裂破碎带的结构和电性特征进行深入的分析, 结合概率论和数理统计知识, 设置断裂破碎带中介质的介电常数在一定空间范围内随机分布, 建立了较为理想的断裂破碎带模型, 使得正演模拟得到的 GPR 剖面较好地揭示了断裂破碎带显示在雷达剖面上的特征。

在时域有限差分算法中, 介质被剖分为尺度很小的矩形网格, 通过对每个剖分网格赋予相应的电性参数实现对地下电性结构的建模。对基岩裂隙中充满水的断裂破碎带区域, 设置其每个剖分网格的电性参数, 随机选取基岩或水的电性参数。由概率论知识可知, 随机数在 $[0, 1]$ 的取值范围内, 每个值的出现概率是相同的, 因此, 可以通过以下方法来实现对具有不同孔隙度的断裂破碎带的建模: 依据断裂破碎带的孔隙度大小在区间 $[0, 1]$ 设置一个判断值, 依次对破碎带中每个剖分网格处出现的随机数与设置的判断值进行比较, 当随机数大于判断值时, 此剖分网格处的电性参数取基岩的电性参数; 当随机数小于等于判断值时, 则此剖分网格处的电性参数取水的电性参数。例如, 对于孔隙度为 20% 的断裂破碎带, 设置建模时的判断值为 0.2。

2 模型试验

利用时域有限差分方法正演模拟断裂破碎带的 GPR 反射剖面并分析其剖面特征,我们将试验不同的模型参数对于 GPR 剖面图像的影响。下面分别讨论孔隙度和基岩介电常数对断裂破碎带的 GPR 反射剖面图像的影响。

2.1 不同孔隙度的影响

依据断裂破碎带的孔隙度,可以确定基岩的破碎程度,孔隙度越大,基岩破碎越厉害,对工程安全的影响也就越大。为了认识不同孔隙度的破碎带雷达剖面图像反映的特征差异,设计了 1 组 3 个具有不同孔隙度的断裂破碎带模型:模型上层为疏松的土壤,相对介电常数 $\epsilon_1 = 4.0$,电导率 $\sigma_1 = 0.005 \text{ S/m}$;下层为基岩 $\epsilon_2 = 9.0$, $\sigma_2 = 0.0001 \text{ S/m}$;基岩裂隙中充填淡水,淡水的 $\epsilon = 81.0$, $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$ 。断裂破碎带倾斜界面起始位置的水平坐标为 $4.3 \sim 5.0 \text{ m}$,深度为 0.7 m ,向左倾斜,倾角 35° ,孔隙度分别为 50% 、 20% 、 10% ,模型示意图 1,其中模型上层介质为疏松的土壤,下层介质为基岩,破碎带位于基岩中。破碎带中介质的电性参数随机选取基岩或水的电性参数。

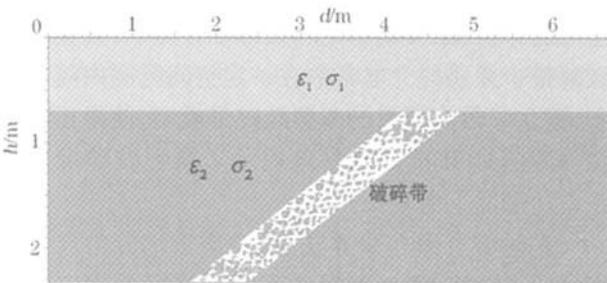
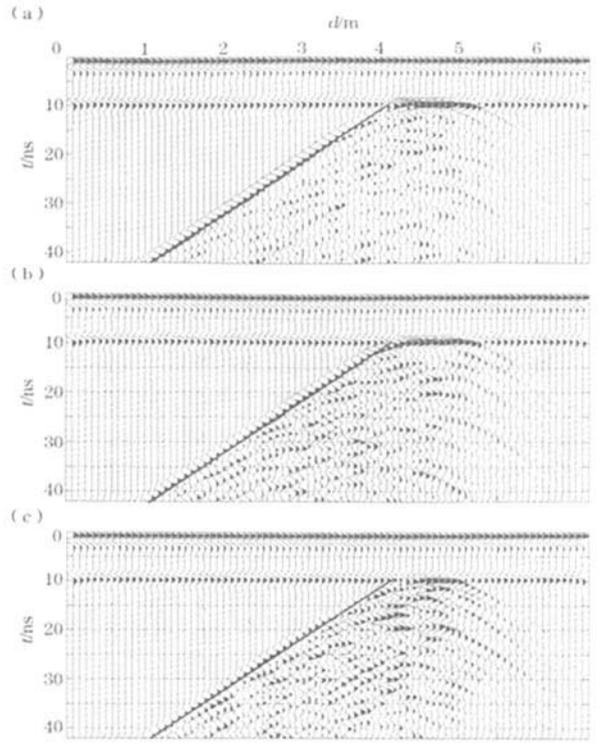


图 1 断裂破碎带模型示意

正演模拟时采用正方形 YEE 氏差分网格^[2]对模型进行剖分,使用 400×140 的网格尺度,其中空间步长 1.7 cm ,时间采样间隔 0.08 ns ,道间距取 6 倍空间步长,模拟的最大时间步数为 560 步。正演模拟采用的 GPR 天线的中心频率 f_0 为 100 MHz ,激励源为脉冲子波 $f(t) = t^2 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t$,其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$,取脉冲的衰减系数 $\alpha = 0.93\omega_0$ 。测线沿 x 方向布设,采用共天线的自激自收的接收方式。图 2 是不同孔隙度的断裂破碎带模型 GPR 正演合成剖面记录,基岩相对介电常数为 9。

由图 2 正演合成的 GPR 剖面记录可以看出,断裂破碎带在探地雷达反射剖面上表现的特征为,地层反射波同相轴错断,较为杂乱,但在破碎带顶面的波组关系仍是相对稳定的,破碎带顶面上反射波振幅能量明显比两侧基岩信号强。破碎带顶界面反射



a—孔隙度为 50% b—孔隙度为 20% c—孔隙度为 10%

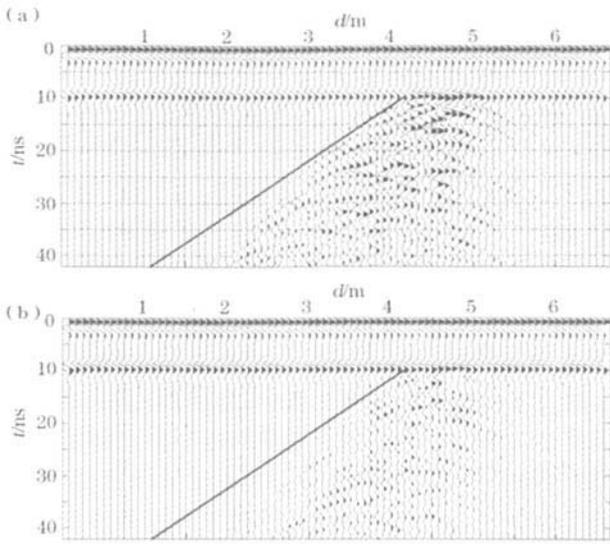
图 2 不同孔隙度的 GPR 正演剖面

波组的同相轴连线与模型中的破碎带的顶界面(如图 2 中粗黑线所示)吻合得非常好,因此,在实际的断裂破碎带 GPR 探测剖面资料解释中,破碎带顶面的位置可以通过相对稳定的顶界面反射波组的同相轴连线确定,破碎带底界面的反射波组无法直接从 GPR 剖面上拾取,即无法由 GPR 剖面确定断裂破碎带的底界面。对比图 2 的 3 个剖面,不难发现孔隙度越小,基岩破碎程度越低,断裂破碎带的顶界面反射波组振幅就越弱,且破碎带内部介质的反射波越杂乱,多表现为随机介质异常点产生的绕射波。

2.2 不同基岩介电常数的影响

模型示意图 1,其中 ϵ_1 、 σ_1 保持不变;下层基岩及裂隙充填物中除 ϵ_2 分别为 9、16、25 外,其余参数不变,断裂破碎带参数除孔隙度 ϕ 均为 10% 外,其余保持不变。破碎带中介质的电性参数随机选取基岩或水的电性参数。

正演模拟时采用正方形 YEE 氏差分网格对模型进行剖分,使用 400×140 的网格尺度,其中空间步长 1.7 cm ,时间采样间隔 0.08 ns ,道间距取 6 倍空间步长,模拟的最大时间步数为 560 步。正演模拟采用的 GPR 天线的中心频率 f_0 为 100 MHz ,激励源设置和测线布设方式同上一组模型试验。图 3 是不同基岩介电常数断裂破碎带模型 GPR 正演合成剖面记录,孔隙度为 10% 。



a—基岩相对介电常数 16 b—基岩相对介电常数 25

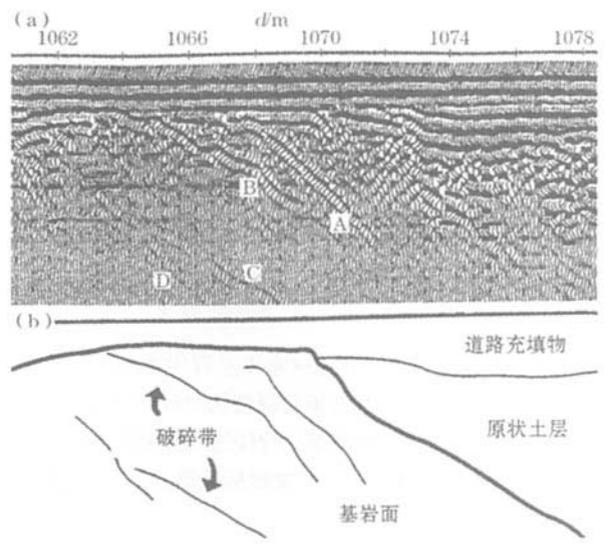
图 3 不同基岩介电常数模型的 GPR 正演剖面

对比孔隙度相同,基岩介电常数不同的断裂破碎带模型正演合成的 GPR 剖面记录图 2c、图 3a 和图 3b,发现随着基岩介电常数的增大,基岩断裂破碎带的顶界面反射波组振幅越来越弱,且其反射波同相轴连线比实际模型中破碎带的顶界面(如图中粗黑线所示)倾角大;同时破碎带内部介质的反射波振幅能量减小,这是由于随着基岩的介电常数增大,破碎带内部介质之间的介电常数比差减小,所以破碎带内部介质的反射波振幅变弱。

3 实例对比

为了验证上面通过正演模拟试验揭示的断裂破碎带在 GPR 反射剖面上显示出的特征的可靠性及其在实际 GPR 探测剖面中是否存在,引入 1 个基岩中存在断裂破碎带的探地雷达探测实例。

图 4a 为 1 条公路路基下的基岩中存在断裂破碎带的实测探地雷达剖面^[3],不难发现剖面记录上存在 A、B、C、D4 组明显的反射波组,它们的振幅能量明显比周围的基岩的反射波强,解释为 4 条断裂破碎带的顶界面。图 4b 为实测剖面的解释成果,图上根据 GPR 探测记录给出了原状土层与基岩的分界面、原状土层与道路充填物的分界面以及 4 条断裂破碎带的分布形态。通过与工程实例对比,发现正演模拟揭示的断裂破碎带 GPR 剖面特征在实测剖面上也是存在的,这说明我们建立的断裂破碎带模型的有效性以及正演模拟计算是可以为相应的实测 GPR 剖面资料解释提供依据的。



a—实测雷达剖面 b—解释结果

图 4 基岩存在断裂破碎带的雷达图像示意

4 结论

以刘光鼎院士提出的综合地质地球物理研究原则中正演与反演相结合的思想为指导,结合概率论和数理统计知识,从建立合适的正演模型入手,通过设置断裂破碎带中介质的介电常数在一定空间范围内的随机分布,建立了更为贴合实际的断裂破碎带模型,使用时域有限差分方法正演模拟其 GPR 反射剖面记录,较好地揭示了断裂破碎带呈现在 GPR 剖面上的特征。通过模型试验,分别对具有不同孔隙度和基岩介电常数的破碎带模型进行正演模拟,分析讨论了孔隙度和基岩介电常数对断裂破碎带的 GPR 反射剖面图像的影响,较为深入地认识了具有不同参数的断裂破碎带模型的 GPR 剖面特征。通过引入工程实例,发现文中正演模拟揭示的断裂破碎带 GPR 剖面特征在实际探测剖面上也是存在的,这进一步说明了笔者建立的断裂破碎带模型的有效性以及通过正演模拟计算来指导 GPR 实际资料的解释是现实可靠的。

参考文献:

[1] 刘光鼎. 地球物理引论[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2005.
 [2] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Trans Ant Propagate. 1966, AP-14: 302.
 [3] 万明浩, 谢雄耀, 赵永辉, 等. 都市公共工程建设中地质雷达的应用[A]. 第三届海峡两岸都市公共工程学术暨实务研讨会论文集[C]. 台北:台北大西洋公约组织科技大学, 1998.

- [4] 吴毅文,陈金华.土壤[M].北京:中国环境科学出版社,2001.
- [5] 朱立新,马生明,王之峰.土壤生态地球化学基准值及其研究[J].地质与勘探,2003,39(6):58.
- [6] 鄢明才,顾铁新,迟清华,等.中国土壤化学丰度与表生地球化学特征[J].物探与化探,1997,21(3):161.
- [7] 陈德友.成都市土壤环境质量及优质农产品基地选区地球化学评价[J].物探与化探,2004,28(3):261.
- [8] 赵小敏,朱碧华,陈美球.鄱阳湖地区土地利用分区及土地持续利用研究[J].江西农业大学学报,1998(4):416.
- [9] 毛大发,鄢新华,刘小兵,等.试论南昌—莲塘一带土壤环境地球化学特征及其环境质量[J].地质与勘探,2003,39(3):72.
- [10] GB/T18407.1-2001,土壤环境质量标准[S].
- [11] NY5010-2002,无公害蔬菜基地土壤质量标准[S].
- [12] NY/391-2000,绿色食品产地环境质量标准[S].

THE PRESENT SITUATION OF SOIL HEAVY METAL POLLUTION IN A VEGETABLE BASE OF JIANGXI PROVINCE

ZUO Zu-fa¹, MAO Da-fa¹, XIONG Sheng-shan²

(1. Institute of Geological Survey of Jiangxi Province, Xiangtang 330201, China; 2. Xiangtang Central Hospital of Nanchang County, Xiangtang 330201, China)

Abstract Based on sampling data from soil of deep and top layers, the authors obtained the standard contents of main heavy metallic elements in soil of a vegetable base in Jiangxi Province, analyzed the distribution and relevant characteristics of five heavy metallic elements in top soil of this base, and probed into the migration features of these elements. According to related laws and decrees issued by the Ministry of Agriculture, this paper preliminarily evaluated the present situation of soil heavy metal pollution in this base and put forward the proposal that the scope of this vegetable base should be reasonably regulated. The research reveals that there exists obvious accumulation of Cd, Hg and Pb in top soil (farming layer) of this vegetable base. Some areas have become "safeless production places" with the Cd, Hg and Pb contents of soil in excess of the Environment Quality Standard for Harmless Food Production Places stipulated by the Ministry of Agriculture. It is found that the original contents of heavy metallic elements in soil are not high, that the accumulation of heavy metallic pollution results mainly from the productive activity of mankind, i. e., from the prolonged unreasonable application of fertilizer and pesticide.

Key words present situation of pollution; heavy metals; vegetable base; a certain place of Jiangxi

作者简介:左祖发(1963-),男,工程师。长期从事地质、球化学、环境与农业地质研究工作。已发表论文数篇。

上接 553 页

CHARACTERISTIC ANALYSIS OF THE GPR PROFILE OF THE FRACTURED ZONE BASED ON RANDOM DISTRIBUTION

HU Rao^{1,2}, WU Jian-sheng², ZHAO Yong-hui²

(1. Shanghai Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. School of Ocean & Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In order to verify the validity of ground-probing radar in search for the fractured zone of bedrock and identify characteristics of its GPR profile, the authors built a fairly good fault zone model by assuming the dielectric constant of the fractured zone which is distributed randomly in a certain spatial range. Using finite-difference time-domain (FDTD) simulation method, the authors obtained the two-dimensional GPR forward profile of the fracture broken belt that can better reveal its features on the GPR profiles. Through simulating different fractured zone models with different crushing degrees or different bedrock dielectric constants, the authors are fully acquainted with their characteristics on GPR profiles. A practical example shows that characteristics of the fractured zone revealed in forward simulation also exist in the practical GPR detection profile. It can thus be concluded that the forward simulation is a practical and reliable means in providing supports for the interpretation of practical GPR profiles.

Key words ground penetrating radar; fractured zone; forward simulation; finite-difference time-domain; random distribution

作者简介:胡昊(1982-),男,同济大学固体地球物理学专业硕士,主要从事城市地球物理、岩土工程检测研究与应用工作。