

探地雷达探测地裂缝的几个实例

李远强

(北京市地质研究所, 北京 100120)

摘要: 由于地裂缝的形成原因多样, 宽度小, 展布特征特殊, 采用探地雷达进行地裂缝探测, 一般很难达到良好的探测效果。通过探地雷达在地下采空、活动断裂、地下水超采等3种不同原因产生的地裂缝上进行探测并取得较好波形图像的实例, 介绍了从天线配置、测线布置到资料处理、图像解释等工作流程, 总结了不同成因类型地裂缝的探地雷达波形特征。通过实地探孔、探槽验证, 说明探地雷达法探测结果准确, 探测结果准确反映了地裂缝深部的发育状况和发现新的地裂缝, 对分析地裂缝的成因和机理提供了科学依据。

关键词: 地裂缝; 探地雷达; 波形特征; 活动断裂

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2012)04-0651-04

地面裂缝简称地裂缝, 是地表岩层、土体在自然因素或人为因素作用下, 产生地层开裂, 并在地面形成一定长度和宽度的裂缝的一种宏观地表破坏现象。当这种现象发生在有人类活动的地区时, 便可成为一种地质灾害。地裂缝的形成原因复杂多样, 按其成因, 通常分为活动断裂裂缝、地面沉降裂缝、滑坡裂缝、崩塌裂缝、地下采空裂缝、黄土湿陷裂缝等。了解地裂缝的分布和地下延伸情况, 结合地质情况分析地裂缝的成因, 可以确定地裂缝的危害范围和影响区域。

1 方法技术介绍

探地雷达(GPR)方法属于地球物理勘探方法中的地磁波法, 是地下浅层、超浅层探测的一种高新技术方法, 自20世纪70年代出现以来, 其方法技术得到了长足的发展, 得到了广泛应用。

探地雷达的探测深度是指其所能探测到目标体的最大深度, 这与仪器的型号、配置及探测现场地质条件有关。由电磁波的趋肤深度公式^[2] ($H \approx 256 \sqrt{\rho/f}$, ρ 为介质电阻率, f 为地磁波频率) 可知, 探测深度与地下介质的电阻率和使用天线的频率有很大关系。地下介质的电阻率越高, 探测深度愈大, 反之愈小; 天线频率愈小, 探测深度愈大, 反之愈大。当探地雷达系统选定后(仪器型号、天线频率及探测方式), 探测深度主要受地下介质的电阻率大小的影响。探地雷达的有效探测深度影响因素还有现场探测地形条件和干扰因素等。

分辨率是描述探地雷达探测到最小异常目标体的能力, 是探测工作中的重要参数, 分为垂直分辨率(R_v)和水平分辨率(R_h)。垂直分辨率与工作频率 $R_v = \lambda/8 - \lambda/4$ 有关, 也与深度有关, 估算经验公式为: $R_v = 0.08h$ ($0 < h < 3$ m) 或 $R_v = 0.5h$ ($h \geq 3$ m)^[3]。水平分辨率的估算公式为^[3]: $R_h = \sqrt{\lambda h + \lambda/4}$ 。表1给出了探地雷达在几种常见介质中不同频率下的横向分辨率。

表1 不同介质、深度和电磁波频率的横向分辨率 m

介质	深度 m	天线频率/MHz		
		50	100	600
空气 $\epsilon = 1$	λ	6	3	0.5
	1	2.74	1.9	0.79
	2	3.67	2.6	1.1
水 $\epsilon = 81$	λ	0.66	0.33	0.05
	1	0.91	0.64	0.25
	2	1.22	0.86	0.35
砂岩 $\epsilon = 10$	λ	1.9	0.95	0.16
	1	1.54	1.1	0.44
	2	2.07	1.46	0.6

2 野外工作及数据处理

野外工作要根据地形条件布置测线, 首先要保证测线垂直于地裂缝, 其次要避开地上和地下的干扰物, 还要保证天线板和地面充分接触, 在测点移动时要保持收发天线间距不变。

由于地裂缝的类型和诱因不同, 地裂缝的发育特征也不一样, 有拉张性地裂缝、挤压性地裂缝和错动地裂缝等, 探测时要根据地质条件和地裂缝的特征进行仪器选型、天线配置和参数设置。如在戒台

寺探测时,使用 50 MHz 天线、间距 3 m、测点距 0.25 m,而在顺义苇沟进行探测,采用 100 MHz 天线,间距 0.6 m,测点距 0.1 m;原因是戒台寺地区发育的地裂缝宽 0.1~0.5 m,深部存在采空区,采用低频天线是在保证探测有效性的前提下增大探测深度,苇沟的地裂缝宽度仅 0.01~0.02 cm,采用高频天线和小点距提高了横向分辨率。

探地雷达方法的数据处理包括数据传输、坏道剔除、零点校正、地形校正、滤波、反褶积、偏移、增益等处理,其目的是压制干扰、突出异常、方便解释,最后绘制出探地雷达波形图或彩色剖面成果图,在此基础上进行异常的解释。

3 戒台寺地裂缝探测

戒台寺位于北京市门头沟区永定镇境内,地处京西马鞍山北麓,地势南高北低,山坡相对较缓,坡度一般为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,地表植被茂密。地层主要为石炭系岩层,倾向北,倾角 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,岩性主要有细砂岩、粉砂岩、页岩、泥质砂岩及黏土矿和煤层。构造断层发育。其周边矿产丰富,有煤矿、黏土矿及石灰石矿等,且开采历史悠久,形成了大小不一、位置不

定的采空区。戒台寺滑坡区内地质构造复杂,岩石破碎,边坡为顺倾结构,具多层软弱带,滑坡体前部发育有秋坡村采空塌陷区,地裂缝分布广泛而杂乱。裂缝类型有拉张开裂型、上下错动型、线状下陷型等,最宽达 50 cm,寺庙建筑多处开裂变形。

图 1 给出了戒台寺与秋坡村间的探地雷达测量结果。该测线顺 G108 国道布置,在测线 71 m 处横穿一地裂缝,地裂缝在地表表现为上下错动型,西侧(小点号)比东侧(大点号)高出 5 cm。从雷达图像上分析,地裂缝浅部 0~8 m 雷达波特征为“V”字形,深部 8~24 m 为稳定的多次强反射雷达波,明显区别于两侧的围岩,近 30 m 深处信号仍清晰可见。说明该地裂缝近于垂直发育,浅部的松散覆盖层存在土体扰动现象。后经探井验证,该地裂缝下方 40 m 深存在老窑采空。采空上部岩体所受应力发生变化,岩体沿裂隙带发生错动,引起地表变形产生地裂缝。深部雷达波的强反射也反映了地裂缝深部岩体破碎,地下水通过该地裂缝流向采空区。地表松散覆盖层在地下水和震动(来往车辆和附近放炮开矿)的作用下,以裂缝为中心向两侧产生扰动,形成了雷达波的“V”字形分布特征。

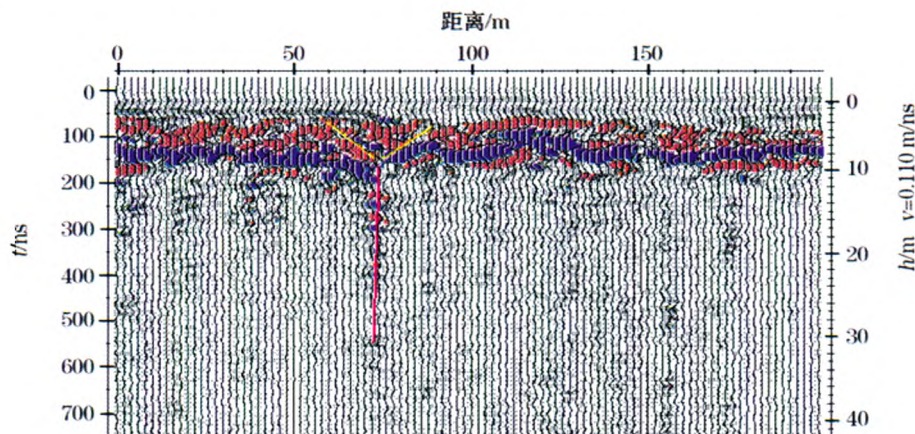


图 1 戒台寺地裂缝探地雷达剖面($f=50$ MHz)

按照表 1 中 50 MHz 天线在砂岩 2 m 深处的水平分辨率为 2.07 m,对于 0.5 m 宽的地裂缝不应该有异常反映,实际工作中却取得了明显的异常。分析原因有 2 个:其一是当收发天线位于地裂缝两侧时,地裂缝相当于一不同电性的直立层夹于收发天线之间,对电磁波的传播起到干扰作用;其二是裂缝带内的空气对电磁波的能量衰减损耗极小,故在地裂缝处雷达波反射信号较强且存在多次反射。

4 高丽营西王路地裂缝探测

高丽营西王路村位于北京市顺义区,村子周边

多处发育有地裂缝,造成房屋墙体开裂,错动下降最大达 15 cm。该区域属于平原地区,地层岩性为耕植土、粉砂、粉土、黏土及有机质土,导致地裂缝的主要因素是构造活动和地下水过量超采。地裂缝发育区处在黄庄—高丽营断裂带上,该断裂是北京市平原区隐伏的活动断裂,自 20 世纪 80 年代以来,地裂缝已经造成多处村民住房墙体、地坪和围墙的破坏,这条地裂缝北起西王路村,西南已过土沟村,裂缝最大宽度达 300 m,断续延伸长度约为 2 500 m。

测线位于顺义规划新城前期区域工程地质勘查工作中开挖的西王路村探槽西侧,近南北向布置,采

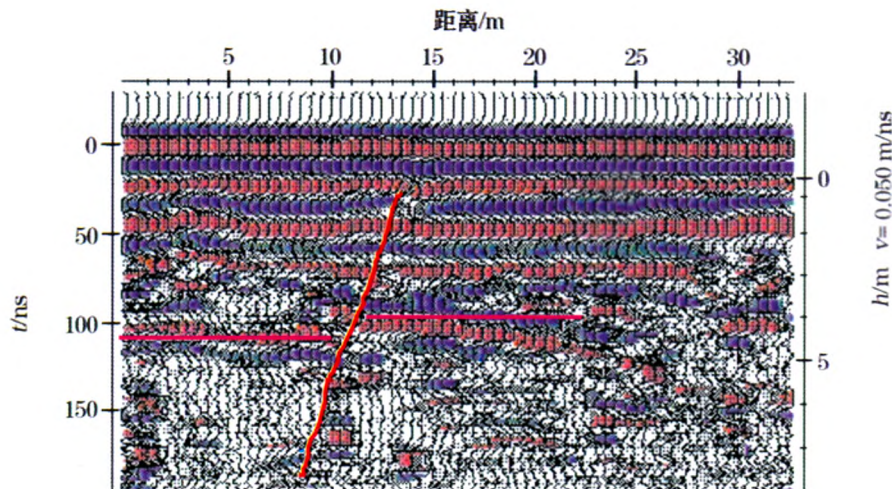


图2 西王路地裂缝探地雷达剖面($f=100\text{ MHz}$)

用 100 MHz 和 50 MHz 分体天线、测点距 0.2 ~ 0.5 m 进行探测,图 2 为探地雷达剖面成果。

从图像上分析,深度 4 ~ 5 m 存在有一明显的地层分界面,该地层分界面在 10 m 处雷达波同相轴明显错动,并向上延伸至地表,地层分界面错动间距约为 1 m。图 3 为西王路地裂缝探槽揭示的实际剖面,其裂缝位置和标志地层与雷达图像吻合的很好。雷达波反射界面与有机质土层(标志层)的分界面相对应。在采用 50 MHz 天线的探测成果图像上,也有明显的雷达波错断异常波形特征。工作区其他测线上也发现有同样的异常,错层间距最大达 2 m。

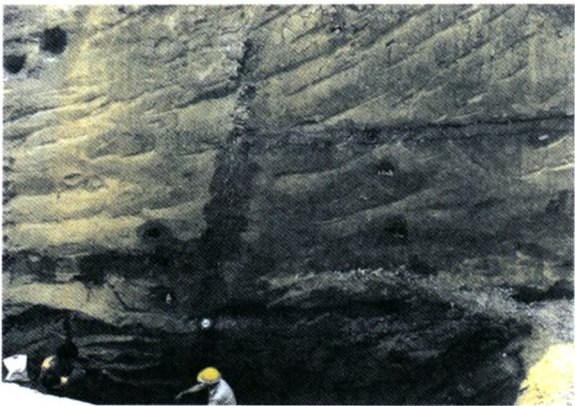


图3 西王路地裂缝实际剖面

5 顺义苇沟地裂缝探测

苇沟地处顺义区南部,在机场轻轨线苇沟段建设桩基钻孔施工中发现一条近东西向的地裂缝,宽 1 ~ 2 cm,无任何充填物。该区地层以黏土为主,处于来广营地面沉降中心的东边缘,地裂缝产生的原因是地下水超采。

探地雷达测线近南北向布置,使用频率为 50 MHz 和 100 MHz,点距 0.1 m,图 4 为其剖面成果。已知地裂缝对应剖面 10.5 m 位置,从图像上分析,该处雷达波波形明显畸变,出现杂波特征,并存在多次反射,深度大于 10 m。在 8 m 处发现的类似异常推测为一小的隐伏地裂缝。该测线 50 MHz 天线探测结果无异常反映,经分析,认为原因是分辨率太低,所以才探测不到。

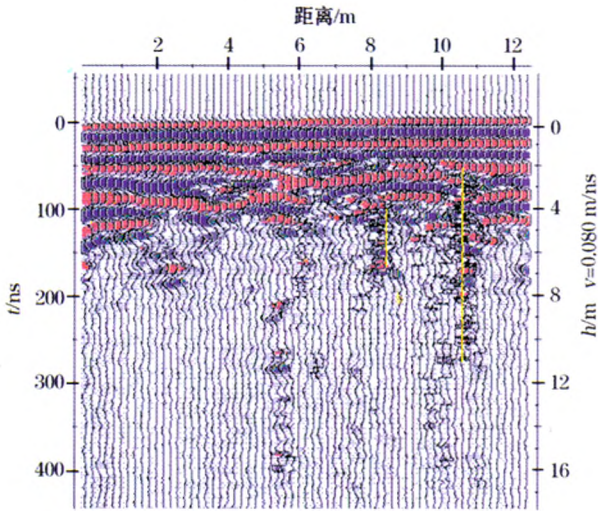


图4 顺义苇沟地裂缝探地雷达剖面($f=100\text{ MHz}$)

6 波形特征分析

地裂缝的成因类型不同,其探地雷达波形特征也不相同。

戒台寺地下采空地裂缝的地质情况为:地表有松散坡积物、基岩为砂岩,裂缝内充碎石、空气,不含地下水(流入深部采空区)。砂岩为低阻体,表层为较高阻体,裂缝处(空气充填)电阻率更高。电磁波

在三种介质中的传播特性不同,覆盖层结构松散,电磁波反射波形信号强;基岩砂岩致密,电阻率值低,信号衰减快,信号弱;地裂缝处岩体松动且充填为空气,故反射信号很强,且存在多次反射。另外地表松散覆盖层在地下水和振动的影响下易向地裂缝方向移动,产生岩土体的扰动。故其上部波形呈以裂缝为中心的“V”字形分布的特征。

高丽营活动断层地裂缝的地质情况为:浅层均为第四系黏土层,局部夹有机质层。有机质层为低阻体,黏土位相对高阻体。有机质层很薄,是明显的电性反射界面。因受断层控制,地裂缝处表现为地层上下错断,因为裂缝宽度极小,甚至无缝隙,在平原区地面上不易被发现。雷达波波形在有机质地层电性界面处产生很强的反射波,其同相轴连续稳定,在地裂缝处表现为该反射波同相轴被错断。说明该处地层被错断,并且其错断距离大致等于断层上下两盘的落差。

苇沟地面沉降地裂缝的地质情况是:浅层均为第四系黏土层,地裂缝宽度小,分布较浅,多为空气充填。黏土层为低阻体,细小地裂缝(空气充填)为高阻体。其取得较好探测效果的原因与戒台寺地裂缝类似,只是该处地裂缝宽度小,对雷达波的传播的影响小,故雷达波波形表现为窄小的杂波多次反射特征。

7 结语

用探地雷达进行地裂缝探测,通过正确的现场测线布置、参数设置及地下介质的物性参数选取,科学有效的数据处理,获得高质量探测成果图像,有利于雷达图像的解释。在进行雷达图像解释时,要做到具体情况具体分析,不同类型的地裂缝会出现不同的雷达波特征。如果雷达波是较宽的多次强反射,则说明地裂缝较宽,且无充填物或充填物少;若雷达波形同相轴错断,说明地层发生错断处出现裂缝;若雷达波发生高频杂波畸变,则是裂缝中密实度低的松散介质或小裂缝对电磁波的吸收、衰减作用造成。

参考文献:

- [1] 李大心. 探地雷达方法及应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [3] 赵永贵. 地质雷达技术及应用[R]. 中国科学院地质与地球物理研究所,2003.
- [4] 曹玉立,等. 北京戒台寺滑坡工程地质勘察报告[R]. 中铁西北科学研究院,2005.
- [5] 张长敏,等. 北京西山重点区段采空塌陷勘查报告[R]. 北京市地质研究所,2006.
- [6] 贾三满,郭萌. 从高丽营探槽分析黄庄—高丽营断裂与地裂缝的关系[J]. 城市地质,2007,(4).
- [7] 卫万顺,等. 北京地质灾害[R]. 北京市地质矿产勘查开发局,北京市地质研究所,2008.

WAVEFORM CHARACTERISTICS OF GPR GROUND FISSURE EXPLORATION

LI Yuan-qiang

(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

Abstract: As ground fissures are characterized by varied geneses, small width and special distribution, the utilization of Ground Penetrating Radar (GPR) for ground fissure exploration can hardly attain ideal exploration result. Exemplified by relatively good waveform images obtained in GPR exploration of ground fissures of three different geneses (underground mining-out, active faults and groundwater over-exploitation), this paper describes the working procedure from antenna arrangement, survey line deployment to data processing and image interpretation, and sums up GPR waveform characteristics of ground fissures of different genetic types. Drilling and trench verification shows that the exploration results of GPR are accurate. The GPR exploration can accurately reflect the development situation of ground fissures in depth and detect new ground fissures, thus providing scientific basis for analyzing the genesis and mechanism of the ground fissure.

Key words: ground fissure; Ground Penetrating Radar (GPR); waveform characteristics; active fault

作者简介: 李远强(1970-),男,大学本科,学士学位,工程师,主要从事探地雷达应用研究和工程物探工作。