

面状不良地质体钻孔雷达响应特征及正演研究^①

钟 声^{②*} 王川婴^{**} 唐新建^{**} 刘 艺^{*}

(* 四川大学建筑与环境学院 成都 610065)

(** 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘 要 依据钻孔地质雷达探测工作中常见的面状不良地质体,利用几何-物理模型分析方法,推导了面状不良地质体的钻孔雷达反射波的传播距离和双程走时公式,研究了不同倾角、不同收发天线距的面状地质体的雷达反射截面特征,分析了面状地质体反射截面倾角随节理裂隙倾角的变化关系,以及钻孔雷达天线收发间距对雷达波传播距离变化的影响。同时,还利用时域有限差分(FDTD)数值模拟方法,对不同宽度的面状不良地质体进行了雷达响应正演研究,为钻孔雷达在岩体工程勘察中的应用及数据解译提供了直观的感性认识和丰富的判读基础。研究钻孔雷达电磁波波在各种地质条件下的传播,对于提高勘察效果和地质解译的准确性具有重要意义。

关键词 面状不良地质体,钻孔地质雷达,雷达反射截面(RCS)正演研究,收发天线距

0 引言

岩体内部的节理、断层、软弱面、层面等面状地质体(planar geo-body)是决定岩土工程稳定性的重要因素。这些面状地质体也称为不连续面或结构面,它们在岩体内部的空间分布与产出状态构成了岩体的结构。国际岩石力学学会将岩体中的断层、软弱面、大多数节理、软弱节理和软弱带等各种力学成因的破裂面和破裂带定义为结构面^[1]。从 20 世纪 50 年代开始,Muller 为代表的奥地利学派以及谷德振、孙广忠等相继对结构面对岩体力学特性和工程稳定性的控制作用、“岩体结构”导致的岩体力学与工程特性差异、“岩体结构控制论”及其岩体变形与破坏的基本规律等问题提出了重要的概念和理论,这些理论的提出使得岩体结构面的精细描述和探测研究显得尤其重要^[2-6]。践行这些理论无一不是必须建立在了解作为暗箱的岩体内部其结构面的

赋存和分布情况。钻孔雷达是一种探测深部岩体结构面分布的有效手段^[7-15],研究面状不良地质体的钻孔雷达反射截面特征具有重要的意义^[16,17],这方面的研究将为后续进行基于钻孔地质雷达与数字钻孔摄像的岩土相对介电常数估算方法的研究提供必要的理论基础,通过这两者数据的结合以及这两种手段对结构面产状的拟合与回归,可以初步估算测试区域的相对介电常数^[18]。对于地下岩土介质中常见的地质目标体一般可以归结为两类,即面状地质体和点状地质体。文献[19]和[20]研究了点状不良地质体钻孔雷达响应特征的形状效应、埋深及充填效应,本文进一步对面状不良地质体的钻孔地质雷达反射信号进行几何-物理模型分析,推导了面状不良地质体的雷达回波传播距离和双程走时公式,并研究不同倾角、不同收发天线距的面状地质体的雷达反射截面特征,同时分析了面状地质体反射截面倾角随节理裂隙倾角的变化关系以及钻孔雷达天线收发间距对雷达波传播距离变化的影响。此

① 国家自然科学基金(41472271,41372317)和 973 计划(2015CB057903)资助项目。

② 男,1977 年生,博士,讲师;研究方向:岩土工程探测及应用,岩土工程防灾减灾,绿色建筑与材料;联系人,E-mail: zhongsheng@scu.edu.cn

(收稿日期:2016-09-18)

外,还利用时域有限差分(FDTD)方法^[21-25]模拟了穿过钻孔和未穿过钻孔不同宽度裂隙的雷达响应图像,为面状不良地质体的钻孔雷达的解译分析及综合应用提供了丰富且直观的判读依据。

1 面状不良地质体的几何模型分析

岩体中存在各种不良地质体,不良地质体与周围岩体的电性差异较大,会形成强烈的反射波。不少地质体可以简化为面状地质体,例如裂隙、层理、断裂、破碎带等。图1所示为钻孔地质雷达电磁波在含节理裂隙岩土介质中传播的简化模型。图中所示区域为岩土介质,内有一竖向钻孔,钻孔地质雷达沿着钻孔深度方向移动,其中T点为发射天线位置,R点为接收天线位置。岩土介质中含有一条平滑节理裂隙AB,节理裂隙AB可以是封闭、半封闭或展开的,其延长线与钻孔轴线相交于E点,其倾角为 θ ,C点为雷达波在节理裂隙上的反射点位置,设此时发射天线发出的电磁波恰被接收天线接收,其反射角为 φ ,电磁波传播距离TC与CR之和 l ,即 $l = l_1 + l_2$,据此可由电磁波在岩体内的传播速度推算出电磁波的双程走时。

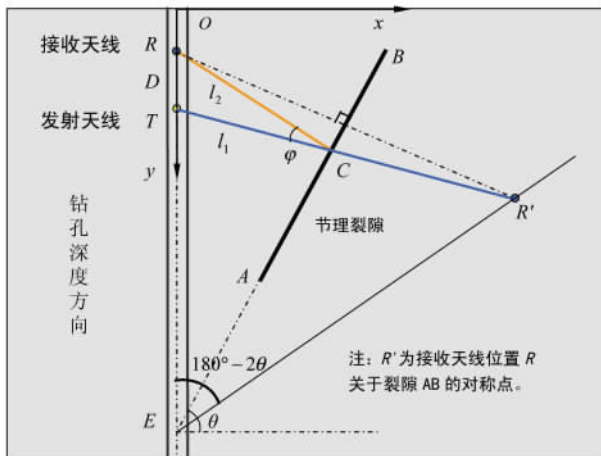


图1 钻孔雷达波在含节理裂隙岩土介质中传播简化模型

钻孔地质雷达电磁波的传播距离 l 可分为三种情况,即:

(1) 当 $\theta = 0^\circ$ 时,雷达电磁波不能通过节理裂隙反射到接收天线,故而此时这种情况将不存在节理裂隙的反射信号;

(2) 当 $\theta = 90^\circ$ 时,若已知天线距 TR 为 d ,节理裂隙到钻孔轴线的间距为 l_f ,则雷达电磁波的传播距离 l 为

$$l = l_1 + l_2 = 2 \sqrt{d^2/4 + l_f^2} \quad (1)$$

(3) 当 $\theta \neq 0^\circ, 90^\circ$ 时,有两种情况:

① 剖面法:若已知天线距 TR 为 d , TE 长度为 h 。作钻孔关于裂隙的对称体,则其与钻孔轴的夹角为 $\pi - 2\theta$,在对称体上标出 R 关于裂隙的对称点 R' , TR' 与 AB 相交于 C 点,由光程最短原理可知 $R-C-T$ 即为电磁波的传播路线,而 $RC + CT = RC + CR'$ 。由余弦定理可得雷达电磁波的传播距离 l 为

$$l = l_1 + l_2 = \sqrt{h^2 + (h+d)^2 + 2h(h+d)\cos(2\theta)} \quad (2)$$

当 $h \gg d$ 时, $l \approx h \sqrt{2 + 2\cos(2\theta)}$,其雷达波形剖面图的同相轴的连线的倾角为

$$\theta' \approx \pi/2 - \arctan(\sqrt{2 + 2\cos(2\theta)}) \quad (3)$$

② 宽角法:若已知接收天线固定不动, RE 为定值 H , TE 长度为 h 。作钻孔关于裂隙的对称体,则其与钻孔轴的夹角为 $\pi - 2\theta$,在对称体上标出 R 关于裂隙的对称点 R' , TR' 与 AB 相交于 C 点,由光程最短原理可知 $R-C-T$ 即为电磁波的传播路线,而 $RC + CT = RC + CR'$ 。由余弦定理可得雷达电磁波的传播距离 l 为:

$$l = l_1 + l_2 = \sqrt{h^2 + H^2 + 2Hh\cos(2\theta)} \quad (4)$$

上式展开得

$$f(h, l) = (h + H)^2 - 4Hh\sin^2\theta - l^2 = 0 \quad (5)$$

由上式可以看出,裂隙处反射波同相轴的连线为抛物线,其顶点位于:

$$h = H(2\sin^2\theta - 1) \quad (6)$$

2 面状不良地质体雷达反射截面分析

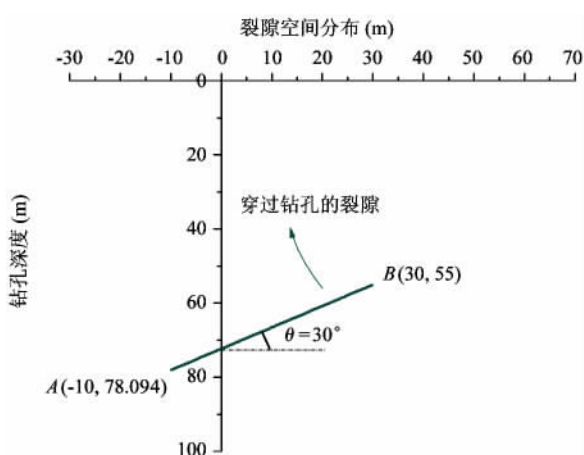
钻孔地质雷达解译基础是拾取反射层,这些反射层实质上就是介质中存在的电性差异。通过前述计算,可以获得面状不良地质体简化模型在每一探测点雷达电磁波传播距离,并依此了解钻孔地质雷达图像剖面。值得注意的是,这里的剖面是距离剖面,而不是时间剖面,时间剖面可依据探测区域的介电常数等岩体电性参数来计算,也可采用FDTD方法进行正演模拟和分析。下面将对面状不良地质体

简化模型在不同节理裂隙倾角、不同收发天线距时的雷达反射截面进行分析。

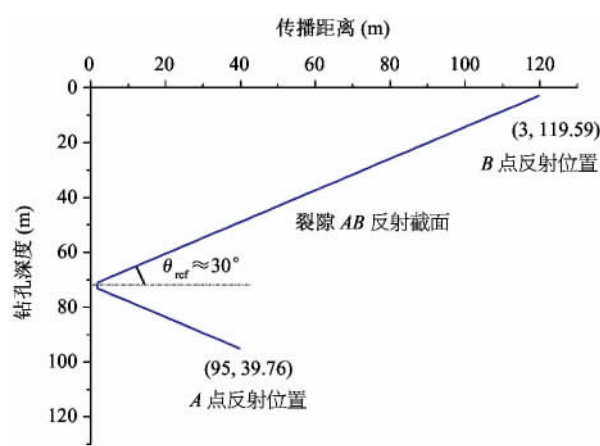
2.1 不同节理裂隙倾角

美国 GSSI 公司生产的钻孔天线, 其收发天线间距为 0.55m, 故这里采用此值对几种常见的节理裂隙倾角 ($\theta = 30^\circ$ 、 45° 和 60°) 进行分析, 以了解钻孔雷达反射波传播距离随探测深度的曲线图 and 变化特点, 并通过曲线回归得到各种不同倾角时钻孔雷达反射波传播距离 l 、反射波反射角 φ 等随探测深度的变化关系。

图 2(a)、图 3(a) 和图 4(a) 中所示分别为倾角为 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 和 60° 时节理裂隙空间分布简化几何模型, 为更好地了解探测深度与反射点的对应关系, 这里选择某一典型的与钻孔相交的封闭裂隙进行分析。通过上述雷达电磁波传播距离的计算公式, 利用 Matlab 和 Origin 等数学工具, 可以获得钻孔地质雷达解释中最为关心的反射层雷达剖面几何形态。图 2(b)、图 3(b) 和图 4(b) 分别反映了节理裂隙倾角 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 和 60° 时钻孔雷达反射波传播距离 l 随探测深度的变化关系。

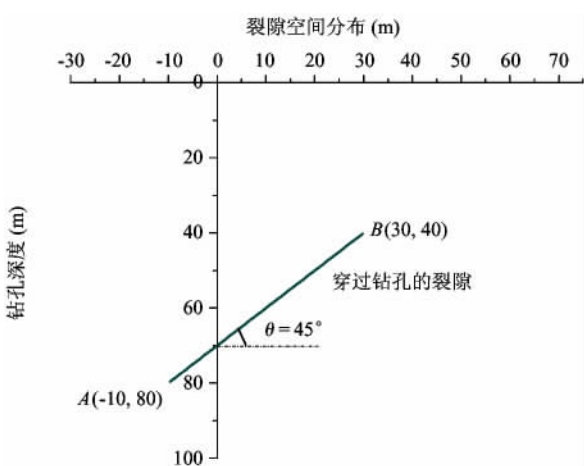


(a) 节理裂隙空间分布简化几何模型

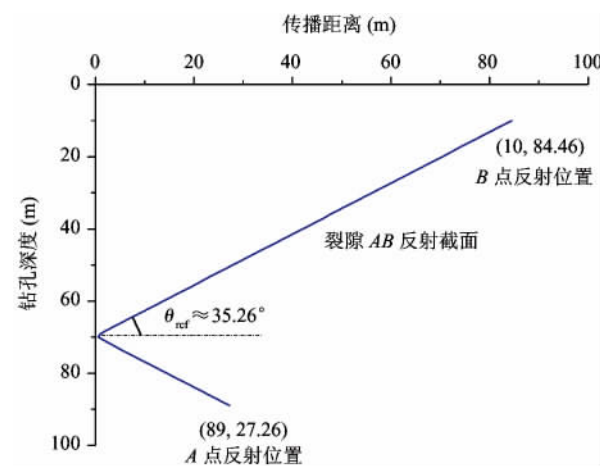


(b) 雷达波传播距离随探测深度的变化曲线

图 2 钻孔雷达波几何-物理模型图 ($\theta = 30^\circ$)



(a) 节理裂隙空间分布简化几何模型



(b) 雷达波传播距离随探测深度的变化曲线

图 3 钻孔雷达波几何-物理模型图 ($\theta = 45^\circ$)

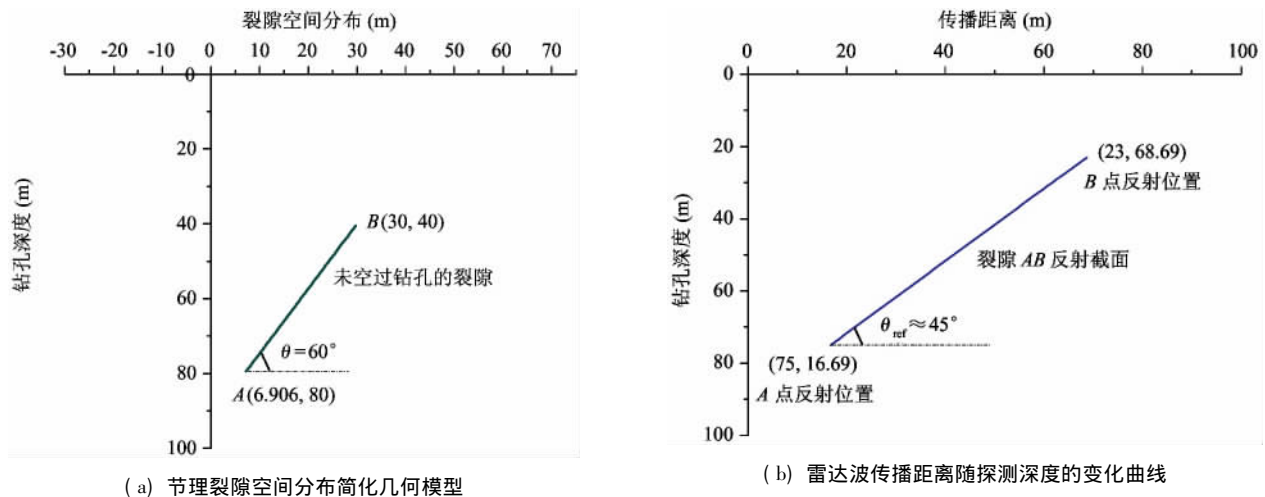


图4 钻孔雷达波几何-物理模型图 ($\theta = 60^\circ$)

图5是节理裂隙倾角 $\theta = 30^\circ$ 和 45° 时钻孔雷达反射波反射角 φ 随探测深度的变化关系。从图中易知,随着节理裂隙倾角 θ 的增大,钻孔雷达反射波传

播距离随探测深度变化曲线的速率则减缓,为更好地了解节理裂隙倾角 θ 与该曲线斜率的关系,我们定义该曲线的倾角为 θ_{ref} ,即面状地质体反射截面

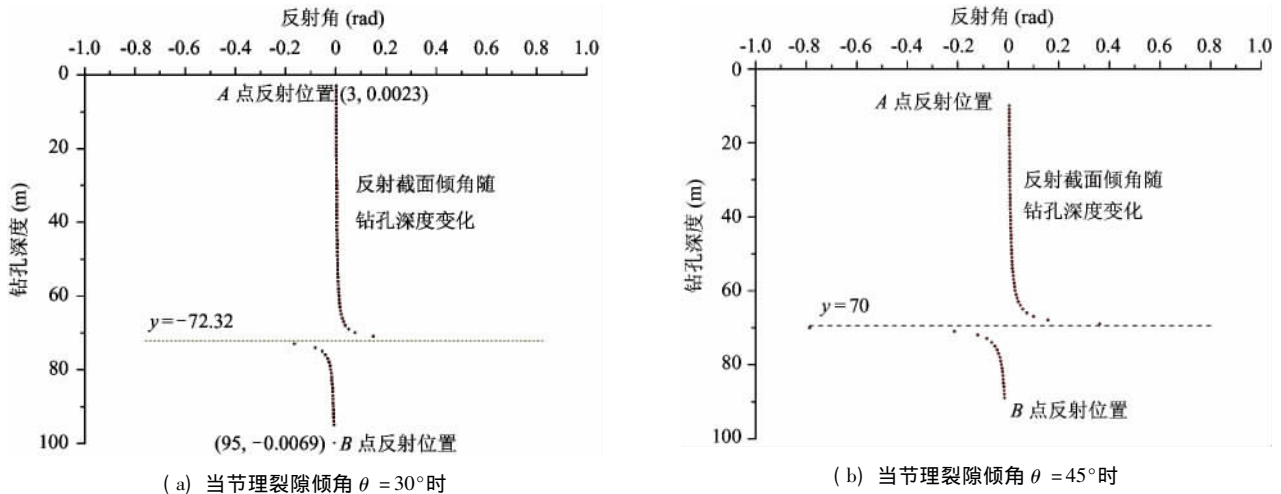


图5 钻孔雷达波反射角 φ 随探测深度的变化示意图

倾角。可知,节理裂隙倾角 θ 越大,则面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 也越大,且对于距离剖面而言,这个值是唯一确定的,表1为节理裂隙 θ 与面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 对应表。

图6所示为面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 随节理裂隙倾角 θ 的变化曲线。对于钻孔雷达收发天线距离为0.55m时,节理裂隙倾角不同时,裂隙倾角 θ 与面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 之间的关系为

表1 节理裂隙 θ 与面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 对应表

裂隙倾角 $\theta (^\circ)$	反射截面倾角 $\theta_{ref} (^\circ)$	裂隙倾角 $\theta (^\circ)$	反射截面倾角 $\theta_{ref} (^\circ)$
5	26.65	90	90
15	27.37	100	70.85
30	30.00	115	49.79
45	35.26	130	37.89
60	45.00	145	31.40
75	62.63	160	28.02
85	80.11	170	26.92

$$\begin{cases} \theta_{ref} = 25.544 + 0.182\theta - 0.0047\theta^2 + 1.181\theta^3 & 0^\circ < \theta \leq 90^\circ \\ \theta_{ref} = 595.689 - 9.979\theta - 0.0591\theta^2 + 1.181\theta^3 & 90^\circ < \theta < 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

根据图 6 曲线可以拟合出式(7)所示的曲线关系表达式。值得说明的是,这个拟合表达式和式(3)稍许不同,它并未忽略钻孔收发天线距对雷达剖面的影响。

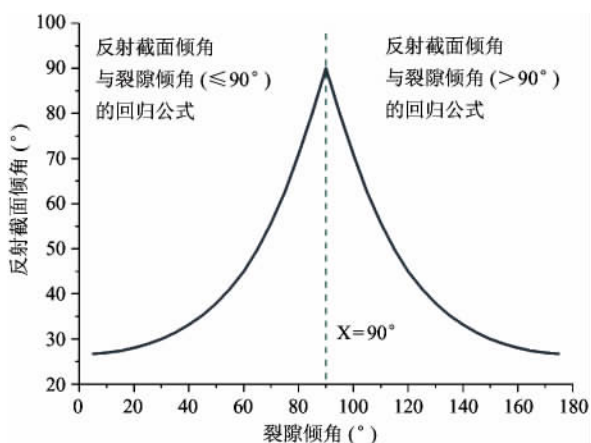
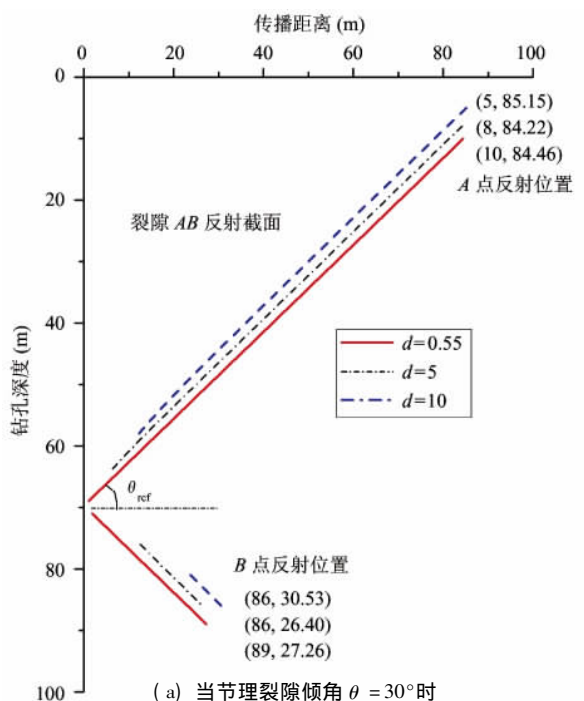


图 6 面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 随节理裂隙倾角 θ 的变化曲线

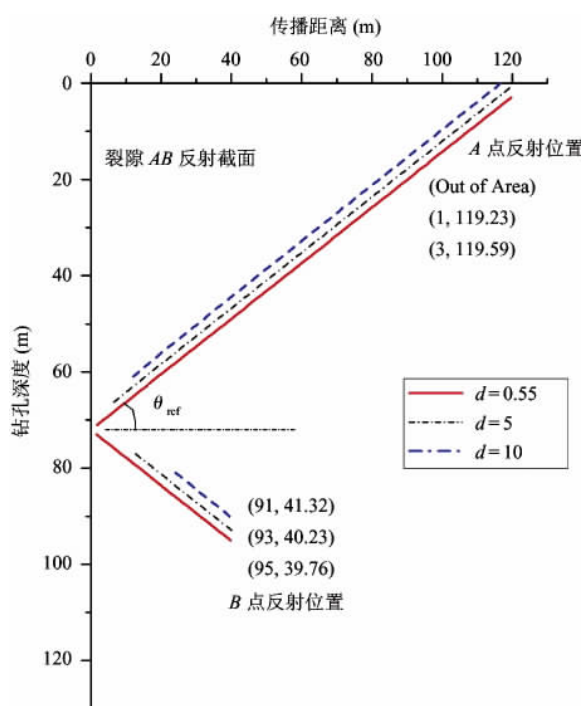


(a) 当节理裂隙倾角 $\theta = 30^\circ$ 时

在实际探测工作中,只要面状地质体与周围介质存在电性差异,就可以在雷达图像剖面中找到相应的反射波与之对应。根据相邻道上反射波的对比,把不同道上同一个反射波相同相位连结起来对比成为同相轴。一般在无不良地质体区域,同一波组往往有一组光滑平行的同相轴与之对应,这一特征成为反射波组的同相性。根据反射波组的特征就可以在雷达图像剖面中拾取反射层。根据钻孔雷达电磁波在所探测岩土介质中的传播速度,可以将时间剖面转化为距离剖面,再利用式(7)即可获得所探测岩体中面状地质体的裂隙倾角。

2.2 不同收发天线距

虽然美国 GSSI 等雷达生产厂家生产的井中天线一般是收发一体化的,其收发天线距是固定的,但不同厂家的收发天线距会略有区别,另外,对于收发天线不固定的情况,研究不同天线距对钻孔雷达电磁波响应的影响是有必要的。图 7 所示为收发天线距 d 不同时钻孔雷达反射波传播距离 l 随探测深度变化关系图。从图中可知,无论节理裂隙倾角 $\theta = 30^\circ$ 还是 45° ,随着收发天线距 d 的增大,钻孔雷达电磁波反射截面的位置只是稍许的向上部偏移了一定



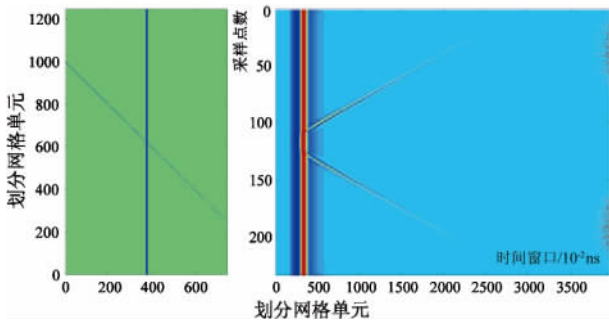
(b) 当节理裂隙倾角 $\theta = 45^\circ$ 时

图 7 钻孔雷达天线收发间距变化时雷达波传播距离变化图

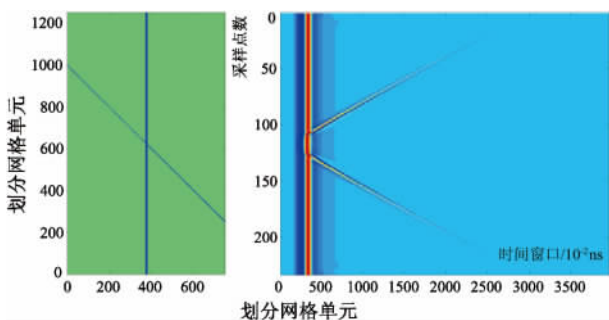
距离,这个距离的大小取决于收发天线距 d 的大小,收发天线距 d 越大,偏移也就越大,和理想的收发天线在同一点的情况比较,偏移距离 $d_e \approx d/2$ 。而面状地质体反射截面倾角 θ_{rcf} 受收发天线距 d 变化的影响基本可以忽略不计。

3 钻孔地质雷达响应的正演研究

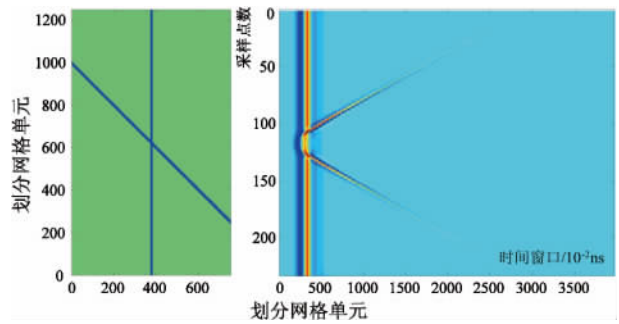
当岩体中存在节理裂隙、层理、断裂、破碎带等面状地质体时,可以将这类地质体简化为平面。本文对不同宽度的面状不良地质体进行了 FDTD 方法的正演分析,文中数值分析所采用的物理常量和 FDTD 参数同文献 [19] 和 [20],此处不再赘述,图 8 所示的正演区域均为 $10\text{m} \times 6\text{m}$ 区域,网格划分为 $0.008\text{m} \times 0.008\text{m}$,图 9 所示的正演区域均为 $6\text{m} \times 4\text{m}$ 区域,网格划分为 $0.02\text{m} \times 0.02\text{m}$ 。图 8 与图 9 所示分别为穿过钻孔和未穿过钻孔不同宽度裂隙的雷达响应图像,裂隙与钻孔夹角均为 45° ,收发天线布置在钻孔中央。从图中可见,对于未穿过钻孔的裂隙来说,反射特征为一条斜线,斜线和钻孔的夹角由



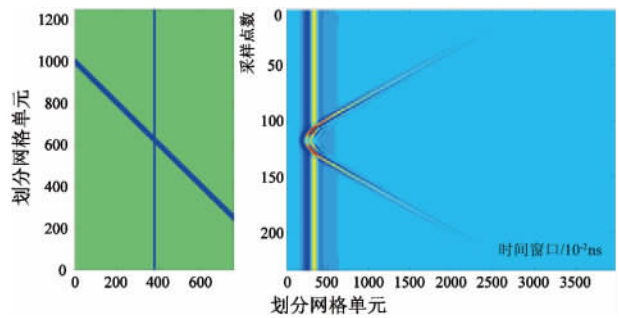
(a) 宽度为 0.01m 裂隙模型及 500MHz 雷达响应



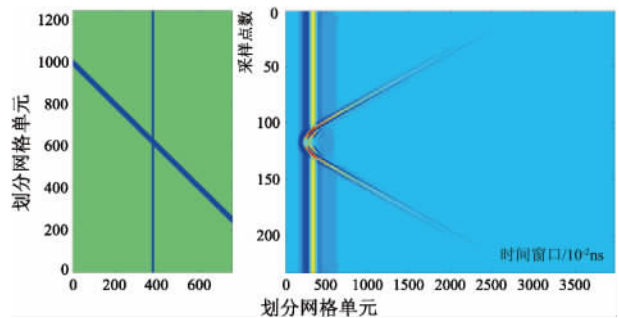
(b) 宽度为 0.04m 裂隙模型及 500MHz 雷达响应



(c) 宽度为 0.1m 裂隙模型及 500MHz 雷达响应



(d) 宽度为 0.2m 裂隙模型及 500MHz 雷达响应



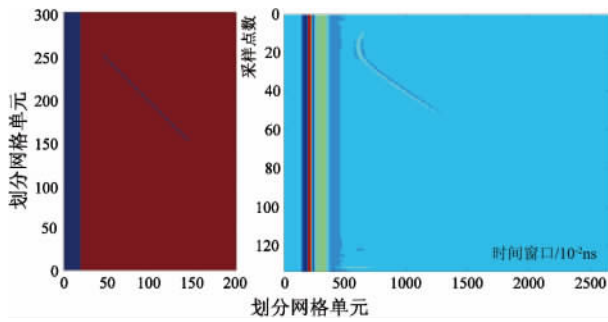
(e) 宽度为 0.3m 裂隙模型及 500MHz 天线雷达响应

图 8 穿过钻孔的不同宽度裂隙模型的钻孔雷达响应

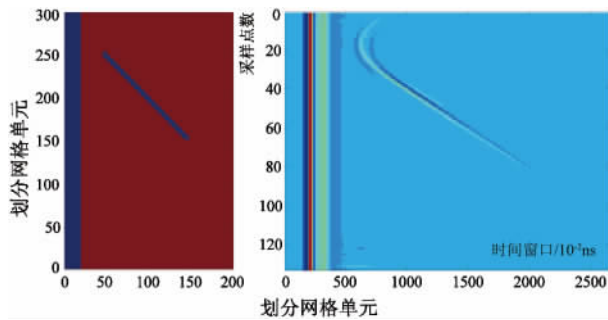
裂隙与钻孔的夹角决定。当裂隙穿过钻孔时,反射特征像张开的剪刀,利用这些特征可以推断裂隙的形态。

4 结论

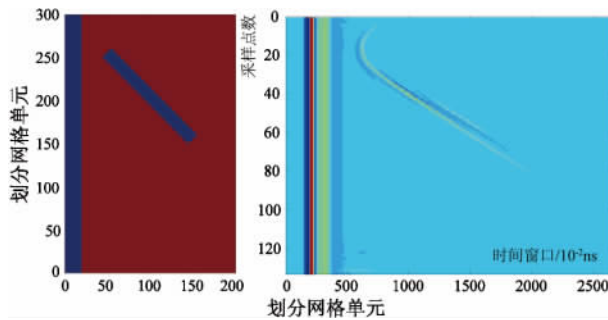
文中对面状不良地质体的钻孔雷达反射截面进行了几何-物理模型分析,推导了面状不良地质体的雷达回波传播距离和双程走时公式,并研究了不同倾角、不同收发天线距的面状地质体的雷达反射截面特征,分析了面状地质体雷达反射截面倾角随节理裂隙倾角的变化关系以及钻孔雷达天线收发间距



(a) 宽度为 0.01m 裂隙模型及 500MHz 天线雷达响应



(b) 宽度为 0.10m 裂隙模型及 500MHz 天线雷达响应



(c) 宽度为 0.30m 裂隙模型及 500MHz 天线雷达响应

图9 未穿过钻孔的不同宽度裂隙模型的钻孔雷达响应

对雷达波传播距离变化的影响。此外,还利用 FDTD 方法模拟了不同宽度面状不良地质体的雷达剖面图,得到了以下结论:

(1) 对面状不良地质体的钻孔雷达反射波的传播距离进行几何-物理模型分析,推导了钻孔雷达电磁波在含面状不良地质体的岩体内反射的回波双程传播距离公式,并对该公式进行简化,获得了剖面法和宽角法两种探测方法的钻孔雷达波剖面图同相轴(即雷达反射截面)的倾角公式,利用该公式可以确定不同倾角 θ 的面状不良地质体与其相应的雷达反射截面倾角 θ_{ref} 之间的关系。

(2) 对面状不良地质体简化模型在不同节理裂隙倾角、不同收发天线距时的雷达反射截面特征进行了分析。以美国 GSSI 公司生产的钻孔天线收发天线间距(0.55m)为准,对三种不同节理裂隙倾角($\theta = 30^\circ, 45^\circ$ 和 60°)的雷达反射截面进行分析,分析了钻孔雷达反射波传播距离随探测深度的曲线图和变化特点,并通过曲线回归得到各种不同倾角时钻孔雷达反射波传播距离 l 、反射波反射角 φ 等随探测深度的变化关系。

(3) 研究了钻孔雷达收发天线距离为 0.55m 时,节理裂隙倾角不同时,裂隙倾角 θ 与面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 之间的关系公式。通过在雷达图像剖面中拾取反射层,即可获取实际探测结果中的同相轴和雷达反射截面。根据钻孔雷达电磁波在所探测岩土介质中的传播速度,可以将时间剖面转化为距离剖面,再利用该公式即可以获得所探测岩体中面状地质体的裂隙倾角。

(4) 研究了钻孔雷达收发天线距离不同时对面状不良地质体雷达反射截面特征的影响。结果表明:随着收发天线距 d 的增大,钻孔雷达电磁波反射截面的位置只是稍许的向上部偏移了一定距离,这个距离的大小取决于收发天线距 d 的大小,收发天线距 d 越大,偏移也就越大,和理想的收发天线在同一点的情况比较,偏移距离 $d_e \approx d/2$ 。而面状地质体反射截面倾角 θ_{ref} 受收发天线距 d 变化的影响基本可以忽略不计。

(5) 对不同裂隙宽度的面状不良地质体在钻孔雷达天线频率为 500MHz 时的雷达反射截面特征进行了正演研究。为钻孔雷达在岩体工程勘察中的应用及数据解译提供了直观的感性认识和丰富的判读基础。

参考文献

- [1] 黄润秋,许模,陈剑平等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用. 北京: 科学出版社, 2004. 1-8
- [2] 范留明,黄润秋. 一种估计结构面迹长的新方法及其工程应用. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 53-57
- [3] 钟登华,李明超,杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575-580
- [4] 卢波,陈剑平,葛修润等. 节理岩体结构的分形几何研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 461-467
- [5] 谢和平. 岩石节理的分形描述. 岩土工程学报, 1994, 17(1): 18-23

- [6] 陈焯,胡树林,张光耀等. 钻孔地震CT技术在岩溶精细探测中的应用. 工程勘察,2014,42(2): 86-91
- [7] 赵卫平,潘和平,李清松等. 井中雷达应用进展. 工程地球物理学报,2005,2(4): 297-303
- [8] 董航,刘四新,吴俊军. 地质勘探中钻孔雷达的天线性能及系统实验分析. 世界地质,2009,28(4): 526-532
- [9] 刘四新,周俊峰,吴俊军等. 金属矿钻孔雷达探测的数值模拟. 吉林大学学报(地球科学版),2010,40(6): 1479-1484
- [10] 程久龙,李飞,彭苏萍等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望. 煤炭学报,2014,39(8): 1742-1750
- [11] 黄家会,宋雷. 地下深部灰岩岩石特性的单孔雷达反射研究. 水文地质工程地质,1999,6(1): 57-59
- [12] 钟声,王川婴,吴立新等. 基于钻孔雷达和数字摄像的动态勘察技术研究. 高技术通讯,2011,21(9): 985-991
- [13] 钟声,王川婴,吴立新等. 钻孔雷达与数字摄像技术在地质勘探中的综合应用. 地球物理学进展,2011,26(1): 335-341
- [14] 刘四新,佐藤源之. 时间域有限差分法(FDTD)对井中雷达的数值模拟. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4): 545-550
- [15] 叶英. 隧道施工超前地质预报. 北京: 人民交通出版社,2017,7: 352-375
- [16] 曾昭发,刘四新,王者江等. 探地雷达方法原理及应用. 北京: 科学出版社,2006. 1-6
- [17] 周学松. 地下目标无损探测技术. 北京: 国防工业出版社,2005. 110-132
- [18] 钟声. 钻孔雷达与数字摄像动态勘察技术若干关键问题研究 [博士学位论文]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所,2008
- [19] 钟声,王川婴,吴立新等. 点状不良地质体钻孔雷达响应特征的形状效应正演分析. 岩土力学,2011,32(5): 1583-1588
- [20] 钟声,王川婴,吴立新等. 点状不良地质体钻孔雷达响应特征——围岩及充填效应正演分析. 岩土力学,2012,33(4): 1191-1195
- [21] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法. 西安: 西安电子科技大学出版社,2001. 2-4
- [22] Ghasemi Faezeh Sh A, Abrishamian M S. A novel method for FDTD numerical GPR imaging of arbitrary shapes based on fourier transform. *NDT & E International*, 2007,40(2): 140-146
- [23] Liu L B. Fracture characterization using borehole radar: numerical modeling. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2006,6(1-2): 17-34
- [24] Yee Kane. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966,14(3): 302-307
- [25] Sullivan Dennis M. Electromagnetic simulation using the FDTD method. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000

Study on borehole radar response's characteristics and forward simulation for planar unfavorable geo-bodies

Zhong Sheng^{*}, Wang Chuanying^{**}, Tang Xinjian^{**}, Liu Yi^{*}

(^{*} College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065)

(^{**} Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071)

Abstract

According to the common planar unfavorable geo-bodies in borehole radar exploration, the formula of propagating/reflecting distance and two-way-travel-time of borehole radar wave in rock mass with planar unfavorable geo-bodies was derived by analyzing the method of geometry-physical model. The RCS (radar cross section) characteristics for planar unfavorable geo-bodies with various dip angles and various antenna intervals were studied. The regression curve relation between the dip angle of fissure and radar cross section angle was given, and also the influence of antenna interval on the propagating or reflecting distance is discussed. Furthermore, the borehole radar response fields of various fissure model intersected or non-intersected with borehole were analyzed with the finite difference time domain (FDTD) method. The simulation results provide visualized perceptual knowledge and abundant interpretation material for use of borehole radar in geologic survey, which improves the accuracy of geological interpretation.

Key words: planar unfavorable geo-bodies, borehole radar, radar cross section (RCS), forward simulation, antenna interval