doi:10.11720/wtyht.2015.4.33

刘成禹,林毅鹏,林超群,等.球状孤石在探地雷达探测成果中的表现特征[J].物探与化探,2015,39(4):860-866.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2015.4.33

Liu C Y, Lin Y P, Lin C Q, et al. The performance characteristic of spherical boulder in the georadar detection [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4):860-866.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.33

球状孤石在探地雷达探测成果中的表现特征

刘成禹,林毅鹏,林超群,刘汗青

(福州大学环境与资源学院,福建福州 350108)

摘要:花岗岩风化壳中分布的孤石对工程建设有较大的危害,较准确地探明孤石的大小及分布具有重要的实际意义。笔者采用现场实测和数值模拟相结合的方法对球状孤石在探地雷达探测成果中的表现特征进行了研究。结果表明:雷达波在孤石处出现了明显的孤形反射,反射弧的张开宽度随孤石直径、埋深的的增加而增大;雷达波中孤石顶点处反射弧的曲率半径与孤石直径近似呈线性关系,与孤石埋深近似呈二次多项式关系。所得结论对孤石分布地区探地雷达探测成果的正确解释有一定的指导作用。

关键词:探地雷达;正演;时域有限差分;孤石探测

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2015)04-0860-07

花岗岩和凝灰熔岩在我国有较广泛的分布,广 东、福建更为集中。闽、粤两省仅花岗岩的出露面积 就达30%~40%。花岗岩和凝灰熔岩的不均匀风化 特别明显,受其影响,风化壳中常常分布大量的孤 石。孤石分布的边坡常常发生崩塌、滑坡、滚石等地 质灾害;在孤石分布地层内进行隧道施工中常常出 现塌方、初期支护大变形等问题^[1]。孤石的存在不 仅对边坡、隧道有危害,还对建筑基础有较大的危 害,如天然基础,当基础与孤石直接接触时往往会引 起差异沉降,导致建筑物开裂等;对于桩基础,往往 会引起沉桩困难、断桩,严重影响桩基质量。因此探 明花岗岩、凝灰熔岩风化地层中孤石的大小及分布 特征对工程建设具有重要的意义。

目前对花岗岩、凝灰熔岩风化层中孤石的探测 主要采取钻探、坑探以及物探等手段^[2-4]。钻探和 坑探是最简单、最直观的方法,但该方法只能探明勘 探深度内勘探点及其附近是否存在孤石。由于钻探 和坑探的费用高且工期长,无法大量布置勘探孔,加 之孤石在很多情况下呈离散状分布,所以,无法准确 地探明孤石的大小和分布。与钻探和坑探相比,物 探具有高效快捷的优点。物探探测主要有高密度电 法、浅层地震勘探、探地雷达探测等方法。风化孤石 与周围地层电性差异不明显,高密度电法的探测精 度和分辨率难以保证;由于孤石大多呈离散状分布、 规模小,波阻抗差异小,地震勘探法的探测精度和分 辨率也难以满足工程要求;探地雷达探测精度和分 辨率最高,因此在孤石探测中采用探地雷达比较合 理。但是,由于探地雷达设备费较高,探测结果需要 专业人员的解释,所以,目前在我国的应用并不普 遍;针对花岗岩和凝灰熔岩风化地层中孤石的探测 虽然有少量报道,但研究得并不深入,对探地雷达探 测孤石的实施要点,影响探测准确性的主要因素及 其影响规律的研究甚少。

探地雷达作为一种先进的高频电磁波勘探技术,具有对探测对象不造成任何损伤、抗干扰能力强、测量结果直观准确和高效率等特点^[5]。从近些年探地雷达的发展来看,其在工程检测和岩土工程勘察中的应用日趋广泛。介电常数上存在差异是探地雷达探测和探测成果解释的基础。由于孤石和周边地层在介电常数上存在差异,这为探地雷达探测孤石提供了可行性条件。

笔者拟采用时域有限差分法,针对岩土体中的 孤石地质体,利用 GprMax2D 软件结合 Matlab 得到 模拟结果,并在实际场地进行相应的模型试验,对数 值模拟和实际试验的结果进行对比,进而总结出岩 土体中孤石的探地雷达反射特性和规律。

1 探地雷达探测地下孤石原理

探地雷达探测孤石的原理为置于地面的发射天 线向地下发射一高频电磁脉冲,当其在地下传播过 程中遇到不同电性界面时,电磁波发生反射折向地 面,被接收天线接收,并由主机记录存储。对存储的 数据进行一系列处理后,根据雷达子波的整体波形、 同相轴变化、频率变化等,推测地下岩土介质与孤石 目标体的电性差异:根据电磁波的双程走时,推测孤 石目标体的埋深等信息。

现场实验仪器及实验设计 2

2.1 测试仪器及参数

实验采用的探地雷达为瑞典 MALA 地球科学 公司(Sweden MALA Geoscience Inc) 生产的 RAMAC X3M型探地雷达。雷达脉冲频率10~200kHz,天 线为中心发射频率 500 MHz 的屏蔽天线。实验中 测试参数为:采样点数370,时窗52ns,采样频率 7 075 MHz,叠加次数 184 次,使用测轮触发。

2.2 实验设计

为了得出孤石在探地雷达探测成果中的表现特 征,笔者在砂土介质中,将直径 D 分别为 10、15、20、 30、40 cm 花岗岩球状孤石,埋设在 50 cm 的深度, 每一次埋设完采用探地雷达进行探测(图1)。



实验设置

数值计算结果与实测结果对比 3

3.1 球状孤石实验探测结果分析





探测成果, 左侧为雷达反射波形图, 右侧为孤石中 间、左侧的单道波形图。由图2可看出,雷达波在孤 石处出现了明显的孤形反射,反射弧的张开宽度随 孤石直径的增大而增大:反射弧弧顶对应的深度即 为孤石的实际埋深 50 cm。

3.2 球状孤石数值模拟结果分析

· 862 ·

采用时域有限差分法进行二维数值模拟,利用 GprMax2D 软件结合 Matlab 得到模拟结果。孤石岩 性、直径、埋深、周边介质以及探地雷达天线频率与 现场实验的相同。由文献[6]查得,砂土的相对介 电常数为 ε_r =20,花岗岩孤石的相对介电常数 ε_r = 6,电导率 σ =0.01 S/m,磁导率 μ_s =1 H/m,模拟区



 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}_{\odot}$

由图 3 的模拟结果可看出:孤石处出现了明显 的孤形反射:反射弧的张开宽度随孤石直径的增大 而增大:反射弧弧顶对应的深度与孤石埋深相同。

现场实测实验与数值模拟对比 3.3

现场探测及数值模拟结果均表明,孤石处出现 了明显的孤形反射且反射弧的张开宽度随孤石直径 的增大而增大。因此,可以用反射弧顶点的曲率半 径来反映反射弧的张开程度并建立球形孤石大小与 反射弧曲率半径的关系,为从探地雷达探测成果中 分析球状孤石的大小提供依据。

由图 2、图 3 可看出,球状孤石的反射弧近似呈

0.8

0.8

0.8

0.8

0.8

0.6

0.6

0.6

0.6

0.6

抛物线形。抛物线在点(x, y)的曲率^[7]

$$K_1 = \frac{|y|}{(1+y^2)^{3/2}},$$
 (1)

曲率半径

$$\rho_1 = \frac{1}{K_1} \, \, \circ \tag{2}$$

以直径为10 cm的孤石为例,如图4所示,在雷 达波形图中,以反射弧顶点为0点,水平向右为 x 轴,垂直向上为 y 轴建立二维直角坐标系。在此基 础上,求取反射弧的曲率半径。



图 4 直径为 10 cm 的实测与模拟孤石雷达波形

图 4a 为实测反射曲线,图 4b 为数值模拟曲线, 以前者为例,取抛物线上一点(1,-0.355),抛物线 过点(0,0)。由数学几何关系可推出抛物线曲线方 程

$$y = -0.355x^2$$
 (3)

按式(1)、(2)计算可得到双曲线顶点曲率半径

$$\rho = \frac{1}{K} = 1.41 \quad (4)$$

同理,可求出其他不同尺寸的雷达波形曲线方程和 曲线顶点曲率半径(表1),按表1结果作出不同大 小孤石的反射弧曲率半径如图5所示。

由图 5 可看出:现场实测与数值模拟得出的球状孤石反射弧顶点的曲率半径非常接近。由于数值 模拟为较理想的状态,模拟中地下介质设置为各向 同性的均质砂土,而在实际现场模型试验时,岩土介

表 1 *h*=50 cm 时不同直径的雷达波形曲线方程及顶点曲 率半径

D/cm	曲线方程		ρ	
	实测	模拟	实测	模拟
10	$y = -0.355x^2$	$y = -0.36x^2$	1.41	1.39
15	$y = -0.343x^2$	$y = -0.35x^2$	1.46	1.43
20	$y = -0.316x^2$	$y = -0.33x^2$	1.58	1.57
30	$y = -0.261x^2$	$y = -0.27x^2$	1.92	1.85
40	$y = -0.235x^2$	$y = -0.24x^2$	2.12	2.08



图5 埋深50 cm 不同大小孤石的反射弧曲率半径 质不是理想的均质砂土,同时现场实验中还存在人 为因素、仪器和环境条件的影响,使现场模型实验与 数值模拟有一定偏差,所以仍存在一些不完全一致 的地方。这说明,采用本文所述的数值模拟方法对 探地雷达探测成果中孤石的表现特征及其规律进行 研究是可行的。

4 孤石直径与反射弧曲率半径的关系

表1 仅为埋深 50 cm 时不同大小孤石的模拟反射弧顶点的曲率结果,笔者同时还模拟出了埋深为 70 cm 和 90 cm 时反射弧顶点的曲率结果,做出孤 石直径与反射弧顶点曲率半径的关系,如图 6 所示。

由图 6 可得出对应的线性拟合方程,以 D 表示 孤石直径,ρ 表示反射弧顶点的曲率半径,r 为曲线 拟合的相关系数,方程如下所示:

埋深 50 cm 时,

$$\rho = 0.024D + 1.105 ; \tag{5}$$

 $\rho = 0.099D + 0.755 ; \qquad (6)$

埋深 90 cm 时,

$$\rho = 0.218D - 0.297 \ _{\circ} \tag{7}$$

由式(5)~式(7)可知,当孤石埋深一定时,随 着孤石直径的增大,反射弧顶点的曲率半径呈线性 增大。





图 6 孤石直径与反射弧顶点曲率半径的关系

5 孤石埋深与反射弧曲率半径的关系

图 7 为不同埋深下孤石的模拟结果,左侧为孤石埋置位置,右侧为探地雷达反射波形,其中孤石直径 D 均为 20 cm,埋置深度 h 分别为 10、40、60、70、90 cm,其他参数设置与 3.2 一节所述一致。

由图 7 可看出:孤石处出现了明显的孤形反射, 反射弧的张开宽度随孤石埋深的增大而增大,反射 弧弧顶对应的深度与孤石埋深相同。根据图 7 得出 表 2 数据。表 2 为 *D* = 20 cm 时不同埋深的模拟反 射弧顶点的曲率结果,同时模拟出了直径为 10 cm



图 7 不同埋深孤石数值模拟结果

表 2 *D*=20 cm 时不同埋深的雷达波形曲线方程及顶点曲 率半径

h∕cm	模拟雷达波形曲线方程	ρ
10	$y = -0.184x^2$	1.12
40	$y = -0.171x^2$	1.53
60	$y = -0.157x^2$	2.32
70	$y = -0.15x^2$	3.02
90	$y = -0.13x^2$	3.85

和 30 cm 时反射弧顶点的曲率结果,做出孤石埋深 与反射弧顶点曲率半径的关系如图 8 所示。

由图 8 可得出,对应的多项式拟合方程,以 h 表

示孤石的埋深,ρ 表示反射弧顶点的曲率半径,r 为 曲线拟合的相关系数,方程如下所示:

- $D = 10 \text{ cm } \square,$ $\rho = (3.426 \times 10^{-4})h^2 + 0.001h + 1.041 ; (8)$ $D = 20 \text{ cm } \square,$
- $\rho = (1.731 \times 10^{-4})h^2 0.002h + 0.974 ; (9)$ D=30 cm \verts.
- $\rho = (6.892 \times 10^{-4})h^2 0.011h + 1.297 \circ (10)$

由式(8~10)可知,当孤石大小一定时,随着孤 石埋深的增大,反射弧顶点的曲率半径呈二次多项 式增大。



图 8 孤石埋深与反射弧顶点曲率半径的关系

6 结论

通过上述数值模拟的计算和现场实测的探测结 果,分析得出以下结论。

(1)采用时域有限差分法,并利用 GprMax2D 软件结合 Matlab 进行探地雷达探测的数值模拟结果 与实际探测结果基本一致,说明此数值模拟方法是 可行的。

(2)球状孤石探测的雷达反射波形明显,大致 为抛物曲线,反射弧中间较明显、清晰,反射能较大, 两侧翼部较模糊,反射能较小,即反射能从中间向两 侧减弱。

(3)在孤石埋深一定时,随着孤石直径的增大, 反射弧的张开弧度逐渐变大,球状孤石反射弧中间 的曲率半径呈线性增大。

(4)在孤石大小一定时,随着孤石埋深的增大, 反射弧的张开弧度逐渐变大,球状孤石反射弧中间 的曲率半径呈二次多项式增大。

参考文献:

- [1] 王浩,刘成禹,陈志波,等.闽东南花岗岩球状风化不良地质发 育特征及其工程地质问题[J].工程地质学报,2011,19(4): 564-569.
- [2] 闰长斌,徐国元.探地雷达技术在岩土工程中的应用现状与展望[J].湖南理工学院学报:自然科学版,2003,16(2):59-63.
- [3] 许锡昌,陈卫东,刘伟.地质雷达和高密度电法在废弃矿井探测中的应用[J].岩石力学,2002,23:127-128.
- [4] 郭新平,吴国兴,许松燕,等.探地雷达在工程勘察中的应用实 例[J].华南地震,2009,29:123-124.
- [5] 杨峰,彭苏萍.地质雷达探测原理与方法研究[M].北京:科学 出版社,2010.
- [6] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [7] 同济大学应用数学系.微积分[M].高等教育出版社,2003.
- [8] 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[J].岩土力学,2011,32(5):1583-1584.
- [9] 葛增超,刘东升.土木工程中常见目标体的地质雷达图谱特征 [J].后勤工程学院报,2005(2):21-22.
- [10] 薛桂霞,王鹏.探地雷达时域有限差分法正演模拟[J].物探与 化探,2006,30(3):244-246.
- [11] 周奇才,李炳杰,郑宇轩,等.基于 GPRMax2D 的探地雷达图像 正演模拟[J].工程地球物理学报,2008,5(4):396-399.

- [12] 李术才,李树忱,张庆松,等.岩溶裂隙水与不良地质情况超前 预报研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2).
- [13] 戴前伟,冯德山,王启龙,等.时域有限差分法在地质雷达二维 正演模拟中的应用[J].地球物理学进展,2004,19(4):898-902.
- [14] 袁明德.探地雷达探测地下管线的能力[J].物探与化探,2002, 26(2):152-155.
- [15] 薛建,曾昭发,王者江,等.探地雷达在城市地铁沿线空洞探测 中的技术方法[J].物探与化探,2010,34(5):617-621.
- [16] 肖兵,周翔,汤井田,等.探地雷达技术及其应用和发展[J].物

探与化探,1996,20(5):378-382.

- [17] basil V, Carrozzo M T, Negri S, et al. A ground penetrating radar survey for archaeological investigation in an urban area[J].Journal of Applied Geophysics,2000,45(3):141-143.
- [18] Wang Tsili, Tripp A C.FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media[J].Geophysics, 1996(1):110-120.
- [19] Irving J, Knight R.Numerical modeling of groundpenetrating radar in 2D Using MATLAB[J].Computers and Geosciences, 2006:1247 -1258.

The performance characteristic of spherical boulder in the georadar detection

LIU Cheng-Yu, LIN Yi-Peng, LIN Chao-Qun, LIU Han-Qing

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The boulder distributed in granite weathering crust has great harm on the engineering construction. Accurately determine the size and distribution of boulder has important practical significance. In this paper, by adopting the combination of field measurement and numerical simulation method to study the performance characteristic of spherical boulder in the georadar detection. The following conclusions are drawn: There is an obvious of radar wave in the boulder reflection. The open width of reflex is increase with the boulder diameter and the buried depth. In radar wave , the radius of curvature of vertices has approximate linear relationship with the boulder diameter. And has Quadratic polynomial relationship with the buried depth. The conclusions obtained in this paper have a certain guiding role on analyzing georadar detection results about boulder.

Key words: ground penetracting radar; forward modeling; FDTD; boulder detect

作者简介:刘成禹(1970-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程、工程地质的研究工作。E-mail:Liuchengyuphd@163.com