

文章编号: 1671-8585(2009)05-0351-05

影响地质雷达探测效果的不利因素分析

王和文, 孙树国, 葛增超

(中国人民解放军后勤工程学院建筑系, 重庆 400041)

摘要: 理论结合工程实例分析了影响地质雷达探测效果的几种常见不利因素: 探测目标体有多层钢构且表层钢构分布密集、探测目标体富水、以及目标体尺寸与埋深比过小, 并举了遇到这 3 种不利因素时工程中的处理方案。当探测目标体有多层钢构且表层钢构分布密集时, 需根据实际情况结合其他探测手段, 如钻孔取心法等; 当探测目标体富水时, 应结合具体情况进行探测判定。当目标尺寸与埋深比过小时, 要做设计优化和技术调整。

关键词: 地质雷达; 电磁波; 钢构; 介电常数

中图分类号: U412.22

文献标识码: A

地质雷达具有高分辨率、高准确率和高效快速的特点, 广泛地应用于场地勘查、工程地质灾害防治及工程质量检测等诸多领域^[1]。我国基础建设发展迅猛, 因各种原因需要进行高精度无损检测的工程越来越多, 地质雷达正好能满足这种需求, 并且可以达到高效、直观的效果, 所以很受工程界的信赖和欢迎^[2]。

地质雷达技术有着突出的优点, 但由于电磁波的特性和探测目标体的结构等原因, 该技术在应用时存在几个常见的不利影响因素: ①探测目标体有多层钢构分布且表层钢构分布密集; ②探测目标体富水; ③目标体尺寸与埋深比过小。本文将从理论结合工程实例对这几种严重影响地质雷达探测效果的不利因素进行讨论, 并提出相应的解决方案。

1 电磁波的特性

地质雷达采用高频电磁波进行测量, 高频电磁波在介质中的传播服从麦克斯韦方程组, 即

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为电荷密度; \mathbf{j} 为电流密度; \mathbf{E} 为电场强度矢量; \mathbf{D} 为电位移; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{H} 为磁场强度矢量; t 为时间。

各向同性介质电磁场的本构关系可简化为:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

式中: ϵ 为介电常数; μ 为磁导率。

对各向异性介质, 结合式(2)与式(3), 麦克斯韦方程组可以推导为只含 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 两个矢量场的形式^[3]。

式(1)、式(2)和式(3)描述了电磁场的运动学规律和动力学规律, 地质雷达采用高频脉冲电磁波在介质中反射和折射对介质进行探测。一般而言, 不同介质的介电常数、电导率、磁导率差异较大, 电磁波速与介电常数的平方根成反比, 电磁波衰减系数与电导率成正比, 电磁波传播距离与电导率成反比^[2]。

一般情况, 地质雷达所探测的目标可简化为各向同性体处理, 有时也必须考虑目标体各向异性^[3]。无论是各向同性还是各向异性的目标体, 其内部电磁波的传播均遵循麦克斯韦方程组, 地质雷达探测均受电磁波和探测目标体自身性质的影响和制约。所以目标体有多层钢构分布且表层钢构分布密集、探测目标体富水、目标体尺寸与埋深比过小都是影响地质雷达探测效果的不利因素。

2 地质雷达探测常见的几种不利因素

隧道衬砌、桥墩桥台、框架梁柱、围岩加固和场地评价等众多工程领域都广泛应用地质雷达探测技术, 在这些工程中常遇到以下几种不利情况。

2.1 探测目标体有多层钢构且表层钢构分布密集

需探明其钢构分布情况, 同时又不能对建筑物造成过大损伤的工程时, 如怀疑工程施工质量问题

收稿日期: 2009-04-03; 改回日期: 2009-05-03。

第一作者简介: 王和文(1981—), 男, 讲师, 主要研究方向为岩土工程。

基金项目: 中国人民解放军后勤工程学院 2008 年度青年科研基金资助。

和工程质量评价等。例如:重庆长寿某水泥厂 5# 储库筒壁钢筋分布探测。该筒壁厚 60 cm,筒壁布设 4 层直径为 25 mm 的钢筋,表层钢筋间距 8 cm,中间层钢筋间距 20 cm,保护层厚度 5 cm。使用瑞典 Mala 公司的地质雷达系统,1.2 GHz 天线、采样点数为 1 024 点、扫描速率 64 c/s、时窗 27

ns、滤波 300~2 000 MHz,所得成果见图 1。

图 1 清晰可见表层 7 排钢筋分布,但无深层电磁信号。反复调整测试参数与采集速率,并在筒壁内外两侧进行测量,均只能测得表层钢筋分布。改用 GSSI 公司 SIR-2000 型地质雷达,400 MHz 与 900 MHz 天线探测结果均无明显改善。

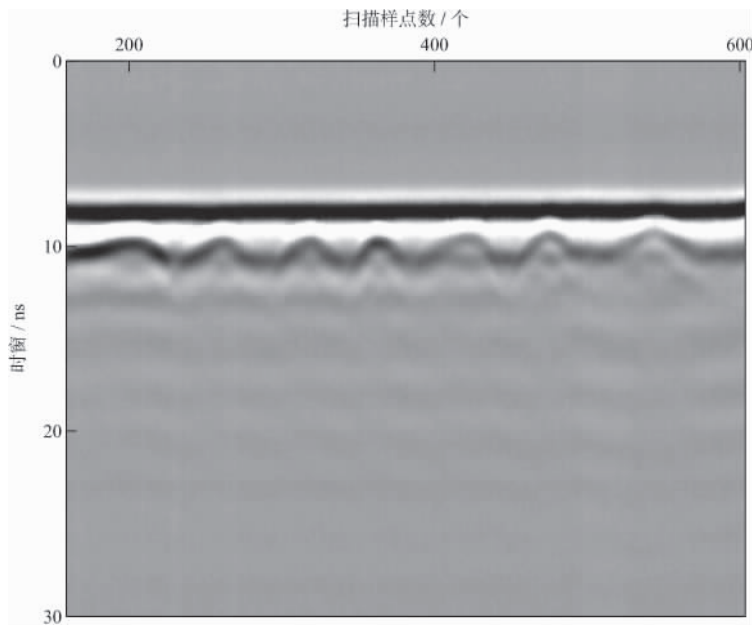


图 1 Mala 雷达 1.2 GHz 天线探测钢筋分布

该水泥储库筒壁厚度仅为 60 cm,周边测试环境良好,但地质雷达只能测得表层钢筋分布。经分析:该筒壁表层钢筋分布密集,而钢筋的电导率大,入射电磁波在该处产生极大衰减,余下部分电磁波经表层钢筋间空隙入射至深层遭遇异性物质(第二层钢筋)产生反射信号回程中再次遭遇表层钢筋而产生电磁波衰减,以至雷达接收天线获得深层电磁波反射信号极弱,几乎等同于深层电磁波反射信号被完全屏蔽,从而无法分析水泥储库筒壁深层钢筋分布。

本例中采用地质雷达法检测水泥储库筒壁各层钢筋分布情况需结合其他方法。采用钻孔取心法配合地质雷达法普查该水泥储库筒壁的表层钢筋分布,钻孔取心法对个别位置进行抽查,结果表明两种方法结合应用效果良好,既查明了该工程的钢筋分布情况,又有效地控制了因检测对建筑的损伤。

图 2 为重庆忠县某危岩治理后锚杆分布探测。该危岩体被植入了较多锚杆,从图中可以清晰地看出 20 余根锚杆的具体分布位置。

目前我们的试验数据不够充分,尚未得出地质雷达能有效探测多层钢构分布需要表层钢构的最

小横向间距以及各层钢构横向间距同各层钢构的纵向距离之间的关系,这是下一步研究的重点。

2.2 探测目标体富水

含水率不仅影响着介质的工程力学性质,也影响着介质的电磁学性质,因此水是对地质雷达影响最大的因素之一。就不同的探测目的,水的存在能给地质雷达探测工作带来相应的有利和不利影响。当目标体的空洞、裂隙中富水时,地质雷达的异常反射信号将会加强,水的存在有利于空洞、裂隙的判别。

但更多时候目标体富水信号将完全屏蔽其他信号,不利于探测。如:重庆渝中区某公路隧道衬砌检测。探测采用 GSSI 公司的 SIR-2000 型地质雷达,900 MHz 天线。图 3 为该隧道初衬中有钢支撑的无漏水区测试成果,可以清晰地分辨出钢支撑的分布位置与数量。图 4 为该隧道一漏水区测试成果,该处漏水呈喷射状,测得波谱及灰度图中均可见水的强烈电磁反射信号,而灰度图及变面积图上均无明显钢支撑信号,而经开凿验证,图 4 位置衬砌内部布设有钢支撑。

水是自然界中介电常数最大、电磁波速最低的介质,由式(1)可知,如果探测目标体富水,将使得

通过富水区的电磁波能大量损耗,其传播速度急剧减小,传播距离大幅缩短。且富水区的电磁反射信号非常强,将相应削弱其他异性物质的反射信号,

如果目标体中富水区偏大,水的电磁反射信号往往会干扰甚至完全屏蔽目标体内其他物体的电磁反射信号。

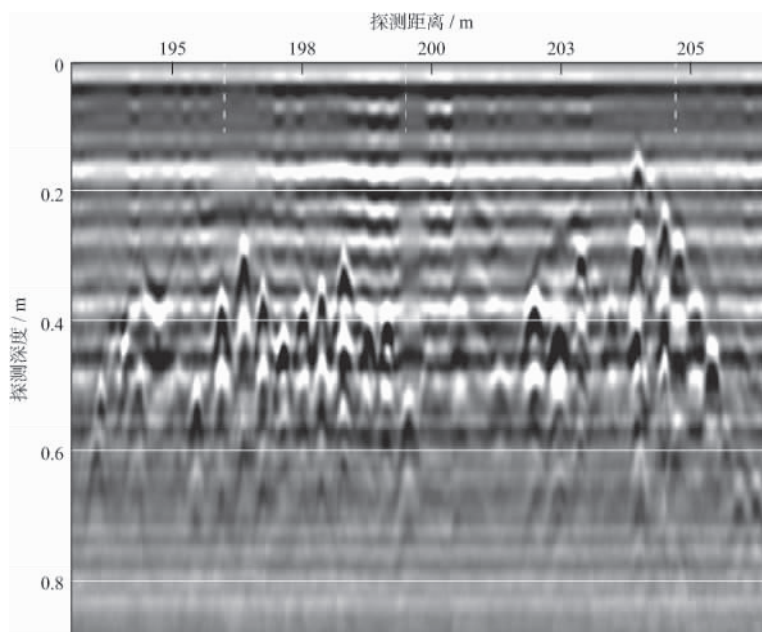


图 2 SIR-2000 雷达 400 MHz 天线锚杆分布探测

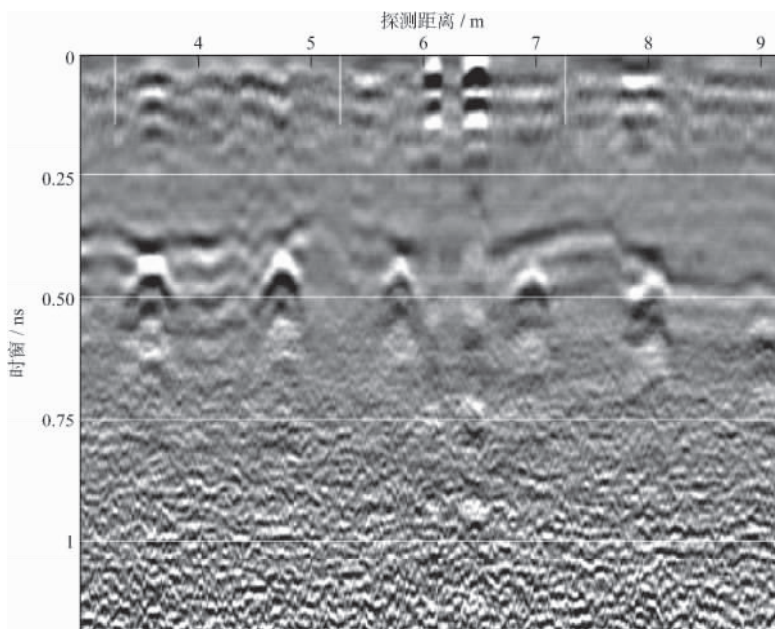


图 3 衬砌钢支撑测试成果

黄秀成等^[4]以沥青混合料的不同含水量进行试验,所得沥青混合料的含水量与介电常数之间的关系见图 5 和表 1。

通过测定探测目标介电常数的众多工程实例统计分析,我们认为:混凝土、岩土体介质的含水量与介电常数曲线斜率通常在 0.8~1.2 之间,且受饱和度的影响较大;而当土体介质含水量达到 40% 以上时,其介电常数变化减缓,渐趋常

数,同 Topp^[5]所得含水量与介电常数关系有一定差异。

介电常数的平方根同电磁波在介质中的传播速度成反比,因此含水量的增大导致介电常数的增大将导致电磁波在介质中的传播速度大幅降低,且由于雷达扫描样点数同主频、时窗及 A/D 采样分辨率的制约关系,电磁波在介质中的传播速度降低又将使得目标体探测深度降低。

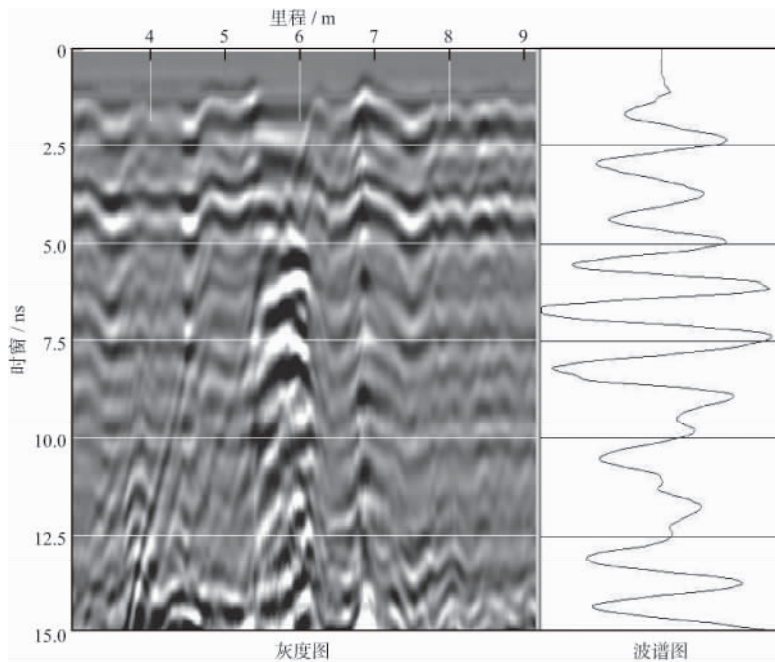


图 4 衬砌钢支撑、漏水测试成果

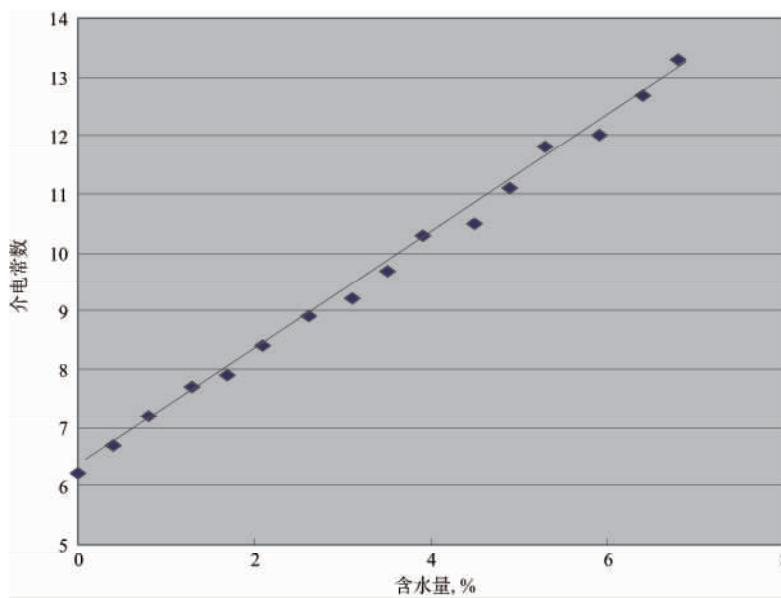


图 5 沥青混合料含水量与介电常数关系

表 1 沥青混合料含水量与介电常数的关系

介电常数	含水量, %	介电常数	含水量, %
6.2	0	9.7	3.5
6.7	0.4	10.3	3.9
7.2	0.8	10.5	4.5
7.7	1.3	11.1	4.9
7.9	1.7	11.8	5.3
8.4	2.1	12.0	5.9
8.9	2.6	12.7	6.4
9.2	3.1	13.3	6.8

2.3 目标体尺寸与埋深比过小

水平分辨率是雷达能够分辨的物体水平最小

尺度,水平分辨率与目标体的埋深及电磁波长相关,波长由天线频率和介质波速决定。其最小分辨圆柱半径可按式(4)计算:

$$R_f = (\lambda h + \lambda/4)^{1/2} \quad (4)$$

式中: R_f 为最小分辨圆柱半径; λ 为电磁波长; h 为柱体顶面埋深。

垂向分辨率是雷达能探测到物体的垂向最小尺度,垂向分辨率与目标体的埋深有关,随深度的增大,分辨率降低。深层目标体垂向分辨率约为其埋深的 0.08 倍,地质雷达探测尺寸与埋深比小于 1/10 的目标体很难得到有效成果^[1]。

探测环境的差异对雷达探测分辨率的影响极

大,由式(4)可知,水平分辨率受电磁波波长影响,而波长是电磁波在介质中传播速度决定的,电磁波速与介电常数的平方根成反比。因此在进行现场地质雷达探测前须较为准确地预估目标体的介电常数以便探测方案的设计与参数的设置。如:重庆沙坪坝区某住宅小区消防水管漏水探测,水管直径 10 cm,小区外环消防水管埋深约 50 cm,小区内环消防水管埋深约 200 cm。采用 GSSI 公司的 SIR-2000 型地质雷达探测,因小区内、外环消防水管埋深不同,故采用了不同频率的地质雷达天线。

图 6 为采用 900 MHz 天线测得小区外环 3 个并排的消防栓位置,电磁反射信号形成清晰的 3 个并排的反射弧,分别呈半张开伞形,其波谱第一反射振幅为负,由于富水区将产生强烈异常反射信号,沿此线追踪可准确判定外环消防管周围是否富

水,从而分析消防管漏水情况。

地质雷达天线频率越高,其波长越小,由式(4)可得其最小分辨圆柱半径也越小,也越有利于探测小尺寸目标。因例中内环消防管埋设较深,且回填土的相对介电常数较大,采用 900 MHz 天线无法测得内环消防管埋深位置信息,故采用 400 MHz 天线采集。图 7 为采用 400 MHz 天线探测小区内环消防管成果,因消防管尺寸与埋深比过小,从地质雷达测试数据几乎不能分辨消防管的电磁反射信号,但可以探测出埋管深度范围是否富水,因此探测小区内环消防管时需先采用金属管线探测仪将内环消防管定位,再用地质雷达探测其下是否富水以分析内环消防管漏水情况。目前国内外很多学者都在致力于地质雷达探测深度与分辨率这一矛盾体的研究。

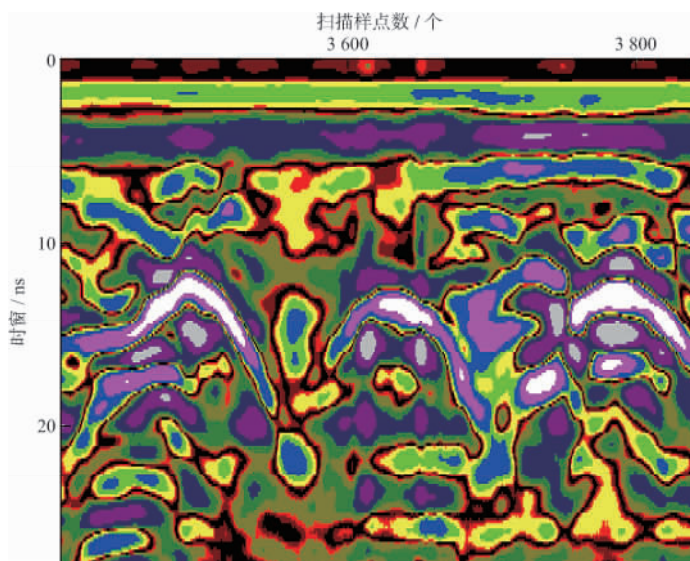


图 6 900 MHz 天线测试 3 个并排消防栓成果

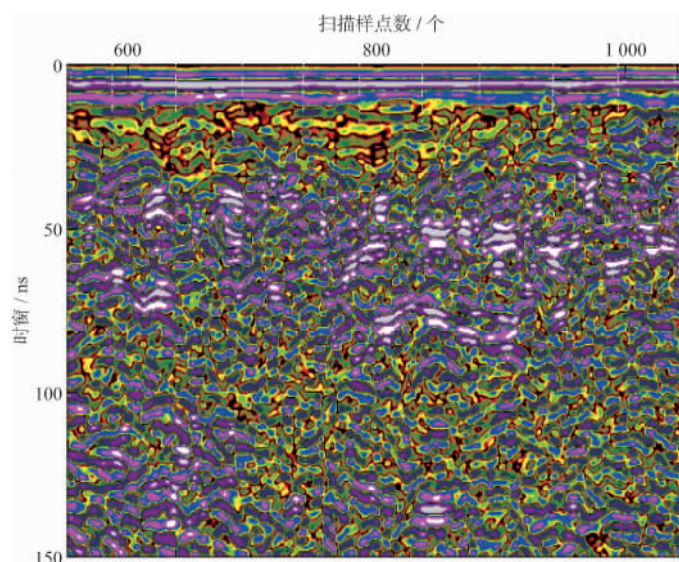


图 7 400 MHz 天线测试消防管漏水成果

(下转第 361 页)

3 结束语

地质雷达探测技术应用非常广泛,但其探测效果受探测环境影响较大。

1) 当地质雷达探测遇有不利影响因素时,须依据预估目标体的介电常数进行探测方案设计与参数的设置,并根据实际情况结合使用其他探测手段。

2) 当目标体富水时,容易造成误判、漏判,对富水区的探测判定需持谨慎态度。

3) 当目标体尺寸与深度比过小时,应充分核算所得成果分辨率是否满足探测要求,并做相应的设计优化和技术调整。

参 考 文 献

- 1 赵永贵. 中国工程地球物理研究的进展与未来[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 305~309
- 2 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 1~157
- 3 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 1~239
- 4 黄秀成, 王子彬, 李海军. 路面雷达在沥青路面防排水能力方面的检测应用[J]. 广东公路交通, 2008(2): 1~4, 12
- 5 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in Coaxial transmission Line[J]. Water Resources research, 1980, 16(3): 574~582

(编辑:任 鹏)