

物探新技术在工程地质中的应用现状及其进展

吴国晓, 杨凤根

河海大学土木工程学院, 南京 (210098)

E-mail: guoxiao1981@sohu.com

摘要: 本文结合国内外现阶段几种物探新技术的发展情况, 在分析前人应用实例的基础上, 简要论述了地震波 CT 技术、TSP 法、高密度电法及地质雷达等在工程地质中的应用和发展情况。根据这些方法的不同特点和在不同工程中的应用效果, 总结和归纳了各自的应用范围和优缺点, 并对各种方法今后的研究方向和发展前景进行了探讨和预测。最后, 作者进一步分析了综合物探在工程地质领域的良好应用效果及发展趋势。

关键词: 地震波 CT 技术; TSP 法; 高密度电法; 地质雷达; 综合物探

1 前言

近年来, 随着物探新技术的发展, 其在工程地质上的应用越来越广泛。由于物探技术具有经济、快速、效果好等特点, 尤其是对探测对象不造成损伤, 从而使其显示出强大的生命力。目前, 随着计算机技术的发展和各种反演方法的不断创新, 物探技术正朝着探测精度更高、探测范围更广、解释更准确的方向发展, 表现出前所未有的广阔发展前景, 被广泛应用于工程、环境、灾害地质调查等领域, 越来越受到人们的关注。相信在不久的将来, 物探技术必将在工程地质领域发挥更重要的、不可替代的作用。下面就近年来发展起来的新的物探方法, 及在工程地质领域的应用现状和未来发展方向做一个简要总结和论述。

2 地震波 CT 技术

2.1 原理

地震波CT技术是利用来自不同方向的地震波(通常是人工激发的地震波)走时来探测对象内部速度结构的成像技术。在不同的地质条件下采用恰当的激发和接收点的排列接收地震波, 利用波动走时反演地质体各个单元的弹性波速, 从而得到被探测地质体的波速分布图像, 这就是地震CT的基本原理^[1]。

2.2 发展和应用

地震波CT技术是近年来发展起来的一种重要地球物理方法。该技术大约在 80 年代中期起步, 最初在石油勘探中开发应用, 并获得较好的地质效果^[2]。随后, 随着计算机技术的进步, 该技术逐渐被应用到工程地质领域, 取得了显著的效果。

陈新球等在对长江三峡永久船闸高边坡卸荷影响带的探测中, 运用地震波CT技术成功的调查出了高边坡卸荷影响带的厚度、断层走向及规模等地质问题^[3]。李张明等采用全方位观测地震波层析成像技术, 获取了三峡工程永久船闸边坡大尺度岩体地质构造分布及整个区域以细小单元形式给出的波速分布参数, 为地质概化模型分析、边坡稳定性分析及变形计算首次提供了完整的力学参数“体”数据^[3]。孙党生等把井间地震波CT成像技术应用于深圳罗屋田水库渗漏勘察, 确定了主要渗漏通道与渗漏点位置, 取得了很好的效果^[4]。

由此可见, 与常规的剪切波速测试相比较, 该技术以速度标识图像表明地质体介质内部结构和特性, 是一种高分辨率、数字化的测试技术方法。它能有效的确定岩溶和岩体破碎带, 更有利于全面细致的对岩体进行稳定性评价, 圈出地质异常体的空间位置, 从而为岩体分区及波速成像开拓了新的途径^[5]。另外, 地震波层析成像技术在研究复杂岩体结构、岩体力学

性状与分区及岩体力学参数获取等方面也是有效的, 值得在其他类似工程项目中推广应用^[3]。

2.3 前景

由于CT所用仪器为浅层地震仪, 因此它涵盖了浅层地震仪在这方面的所有优点, 只要地质钻探能达到的场地, CT均可进行有效的剖面测试而不受文化层和地表障碍物的影响。CT探测深度主要受电缆线长度和井深的约束, 只要有足够的电缆线和井深, CT剖面就有足够的深度。CT成图效果好、直观, 与工程地质参数关系密切, 可为工程设计提供直接依据。所以, CT技术在工程地质中是一项值得大力推广应用的新技术^[2]。

3 TSP 法

3.1 原理

TSP(隧道地震勘探)测量系统是一个优化的由硬件和软件组成的测量系统, 它利用高灵敏度的地震检波接收器, 广泛收集由布置在隧道单侧壁上多个地震激发点产生的地震波, 及其在围岩传播中遇到不同反射界面时的反射波, 经过数据处理和解译, 通过分析反射界面所在的位置, 结合具体的地质情况, 预测影响施工的断层、岩石破碎带^[6]。该系统是专门为隧道和地下工程超前地质预报而设计的, 主要用于预报隧道掌子面前方、上方和下方不良地质的性质、位置和规模, 最大探测距离为掌子面前方 300~500 m, 最高分辨率为 ≥ 1 m 的地质体^[7]。目前世界上主要运用TSP202 和TSP203 系统, 我国都有引进, 并且发展和应用势头良好。

3.2 应用和发展

TSP 探测在我国的工程应用, 在最近几年才发展起来, 应用方面有铁路、公路隧道工程也有水电系统各类长短隧洞工程, 甚至还扩展到煤矿井下断层的探测, 成果可喜^[7]。目前主要应用在探测工作面前方存在的断层、特殊软岩、煤系地层中的煤层、富水砂岩层和煤系地层与其它地层的界线; 探测工作面前方存在的溶洞、暗河和岩溶陷落柱; 探测岩浆岩岩体、岩脉等特殊地质体; 还能查明前述不良工程地质体的位置和规模, 概略地判断不良地质体的围岩级别等^[8]。朱宝龙等结合渝怀铁路线圆梁山隧道的实例, 将TSP系统和超前地质钻孔预报结果进行对比, 显示了该系统的实用性^[9]。张继奎在渝怀铁路线圆梁山隧道施工中, 以TSP系统地质预报技术作为主要预报手段, 进行了 75 次的试验, 并采用综合地质预报相互印证和补充, 在隧道施工中起到了重要作用, 取得了良好的效果^[10]。李志详等运用TSP203 系统对大支坪隧道横洞掌子面HDK0+064 里程处进行预报, 结合实际开挖, 证实了预报的可行性和准确性^[11]。随着TSP系统的不断完善和解译技术的不断进步, 该技术必将在我国的隧道建设中发挥越来越重要的作用。

3.3 前景

该方法与其它超前地质预报的设备相比, 最大优点是: 探测距离远, 分辨率高, 抗干扰能力强, 影响施工很少(洞内探测时间用时较短, 一般 45min即可)^[9]。TSP超前地质探测作为一种新型的工程地球物理探测方法, 采用深度偏移成像方法, 提高了解释精度和预报的准确性。因此, 该方法具有很好的应用前景。但是TSP在实际工作中也存在较多问题, 最主要的问题就是不良地质条件的判读缺乏明确的指标, 更多依赖于经验, 特别是地质专家的经

验。另外,对于与隧道走向近乎平行的断裂带、饱水带,以及几何形状为圆柱体或圆锥体的溶洞等等,尚无法探测识别,这也将是下一步的研究工作重点^[12]。另外,TSP探测所能解决的问题,与施工单位直接需要解决的问题(围岩级别和塌方可能性评价)有一定的差距。为了解决这个问题,汇总工程师还要补充学习一些地质力学知识,最好辅以跟踪地质工作。要提高超前地质预报的精度,除了提高解译水平外,最好是应用2种或2种以上的长期预报方法进行相互印证,从而尽量使多解变为单解^[8]。

最后,目前设备的售价和耗材较高,这也是影响其广泛推广的一大障碍^[7]。

4 高密度电法

4.1 原理

电法勘探是以岩(矿)体电性差异为基础的一大类物探方法。目前,发展较快应用最广泛的是高密度电法。此法是一种陈列勘探方法,它集电测深和电剖面于一身,在观测装置中设置了较高密度的观测点,从而使得数据采集精度高、抗干扰能力强,可以获得更丰富的地质信息。

4.2 发展和应用

高密度电阻率法(简称高密度电法)最早起源于20世纪70年代末期的阵列电探思想,英国学者所设计的电测深偏置系统实际上就是高密度电阻率法的最初模式。80年代中期,日本地质计测株式会社曾借助电极转换板实现了野外高密度电阻率法的数据采集,但是由于整体设计的不完善性,这套设备没有充分发挥高密度电法的优越性,所以并未引起人们的重视。直到90年代随着电子计算机的普及和发展,其优点才被越来越多的人认识。经过20多年的发展,高密度电法在仪器、软件、方法及应用上已取得了明显的成绩。尤其是近几年,高密度电法在工程地质的许多领域都得到了广泛的应用。

在环境工程中,高密度电法主要在边坡软弱夹层调查、冻土调查、岩溶探测中广泛应用。郭秀军等针对高密度电阻率法探测中常用的4类电极排列方式,即温纳、施龙贝格、偶极、二极装置,利用有限元方法二维正演模拟建立了均质土坡滑面、软弱夹层滑面、堆积层滑面、构造破碎带滑面的标准地电模型剖面,明确了进行不同类型滑坡工程地质调查时不同电测装置的探测能力和视电阻率异常模式,指出高密度电法在多数情况下能够在斜坡方向形象地反映出滑坡体和滑动面的分布^[13]。王建军等应用高密度电法对烽火村岩溶地面塌陷进行了勘察,对不同时代的地层分界线进行了划分,并对土层扰动、断层破碎带和岩溶进行了探测,取得了较好的地质效果^[14]。

在工程勘察领域,秦正在对新乡东500KV变电所工程场地的地震安全性评价工作中,利用高密度电法对工程场地及附近进行了地下断层的探测,较准确的找到了断层^[15]。陈泉林等使用由WDJD-1型主机与WDZJ-1多路电极转换器组成的高密度电法测量系统,按照不同的工程要求,采取不同的排列方式进行勘探,实现了对不同岩土层界面的划分^[16]。张亮国等做了高密度电法在沪蓉高速公路勘查中的应用研究,证明高密度电法在灰岩地区查找溶洞、破碎带等是可行的,在二维视电阻率反演剖面上,溶洞、破碎带等的规模和位置是非常准确的^[17]。另外,该方法在城市管线探测、人防工程探测、城市地下埋藏物探测、隧道渗漏探测、断层探测中都有广泛的应用。

在工程检测中,刘宾等对高密度电法在防渗墙无损检测中的应用方法进行了对比研究,通过实际工程应用结果,对高密度电法四极剖面及三极剖面两种方法进行对比研究,对于符

合检测条件的防渗墙,采用三极剖面法,得到了比较满意的检测效果^[18]。马爱玉等把高密度电法应用于黄河提防隐患探测中,取得了良好的效果^[19]。另外,在水坝粘土芯墙渗漏检测、堤坝灌注质量检测、堤坝结构体探测、水库堤防渗漏检测、水库堤防裂缝检测、长江堤防垂直防渗墙质量检测、隧道灌浆质量检测、堤防灌浆质量检测、煤田采空区处理灌注质量检测、考古等其它工程中等也有广泛应用。

4.3 前景

由于高密度电法具有点距小、数据采集密度大的特点,能较直观、形象地反映断面电性异常体的形态、规模、产状等。从而可以较为准确地推测出地质体空间形态情况、地层岩性、断裂等情况。另外,其操作简单,轻便,因此其在工程地质中必将具有广泛的良好应用前景。

高密度电阻率剖面一般采用拟断面等值线图、彩色图或灰度图表示,由于它表征了地电断面每一测点视电阻率的相对变化,因此该图在反映地电结构特征方面具有更为直观和形象的特点。目前,国内的研究,反演的方法主要有佐迪反演、改进的佐迪反演、二维视电阻率断面的快速最小二乘反演等等。国外主要研究计算机自动二维、三维反演等^[20]。

在不久的将来,对于二维高密度电法测量,将同时进行分布式仪器中的时间域激电测量。数据处理方面,也将更加完善。三维高密度电法测量将得到应用,由于其测量时间和反演运算时间长等原因,其应用一直受到影响^[20]。目前,国内外在该领域进行了大量的深入研究,如国外AGI公司和中国地质大学等。相信随着仪器水平和软件水平的不断提高,三维高密度电法必将得到进一步的发展和广泛的应用。

5 地质雷达

5.1 原理

地质雷达又称为探地雷达,是利用超高频($10^6 \sim 10^9 \text{Hz}$)脉冲电磁波探测地下介质分布的一种地球物理勘探方法。探地雷达探测时,通过发射天线向地下定向发射脉冲电磁波,脉冲电磁波能量就向地下(或其它方向)定向辐射。当脉冲电磁波传播过程中遇到有电性差异的界面或目标体(介电常数和电导率不同),就会发生反射和散射现象。通过对接接收的反射波进行校正、叠加、滤波和偏移等处理,从而可以确定介质中电磁波传播速度,再结合电磁波双程走时时间来确定界面或目标体的位置,通过分析接收的反射波形态、幅度、变化特征等并结合相应的地球物理解释模型来判定界面或目标体性质^[21]。

5.2 发展和应用

探地雷达这一概念是在1910年德国一项专利中首先被正式提出,最初是在矿井中试验和应用。20世纪70年代,我国开始引进和研究,并逐渐应用到工程中。到九十年代,由于其高效快捷、高分辨率等特征,在我国浅层与超浅层地质调查及工程中得到了广泛应用。

何开胜等通过太浦河泵站滑坡工程实例,尝试应用探地雷达进行滑动面的探测,探讨了探地雷达辨别滑坡区、滑动面、有机质夹层的探测机理,结果表明,利用探地雷达对堤坝滑动面进行探测是有效的^[22]。薛桂玉等将地质雷达应用到水电工程中,探测出了某水电站滑坡体覆盖层与破碎带的分界面和某抽水蓄能电站库区溶洞,解决了实际问题^[23]。另外,探地雷达在工程地质其它领域也有广泛应用,如探查覆盖层厚度、松软层厚度及分布、基岩风化层界面及分布、基岩节理和断裂带、地下水分布等,探测地下溶洞、空洞、塌陷区、地下排污

巷道、管道及地下管线等。在回填等松软层上该技术探查深度可达 20m 以上，在致密或基岩上探查深度可达 30m 以上。

在工程质量检测中也有广泛应用。主要检测衬砌厚度、破损、裂隙、空洞、渗漏带、回填欠密实区、围岩扰动等，检测精度可达厘米级。检测公路及城市道路路面、跑道、挡墙等各层厚度和破损情况，挡墙、桥梁、混凝土构件等中的空洞、裂隙及钢筋分布等，检测精度可达毫米级^[21]。覃建波等运用探地雷达技术在检测公路隧道、引水涵洞衬砌质量及混凝土结构中钢筋铺设质量时，取得了显著的效果^[24]。

另外，在地下埋设物与考古探索中和隧道超前跟踪探测及预报中都有广泛的应用。如朱向泰在敦煌机场扩建中采用地质雷达进行古墓不良地质体的勘查，取得明显效果^[25]。在隧道超前跟踪探测及预报中，地质雷达可预测前方 30~50m 范围内的断层、溶洞、裂隙带、含水带等地质构造。

5.3 前景

虽然地质雷达技术有着较为广阔的应用前景，但也存在一些局限性，主要体现在两个方面。一是探测深度方面，由于地质雷达发射的电磁波频率越高，电磁波在地下介质中衰减越厉害，探测距离越小，同时分辨率越低。因此在不增加地质雷达体积和重量的情况下如何提高其发射功率和分辨率还有待于研究。二是地质雷达受地面金属体、电线等干扰较大，因此如何避免或较好地压制这些干扰，较为真实地反映地下情况，也是一个值得研究的课题^[23]。

对于探地雷达的应用现状，对硬件的改进方面，应集中在天线及电路的进一步改进上，如频率特性、方向性、灵敏度、阻尼振荡等要与地下介质阻抗相匹配。对于图像的数据处理和地质解释也急需进一步的改善。目前，在工程界，地质雷达数字处理主要使用增益恢复、一维数字滤波等简单的数字处理方法，而频率--波数域滤波、偏移归位处理、复信号分等数字处理方法还在研究之中。另外，宜着重开拓基于电磁波传播特性的预处理软件，而非地震软件的直接移植^[23]。此外，由于地质雷达的图像解释很多时候依赖于专家的经验，因此可以考虑发展人工智能技术，利用机器识别技术来判断异常，并开发专家系统，充分利用专家经验^[23]。

同样，地质雷达技术作为一种物探手段，同样存在多解性和目标体方向不确定性的缺陷。因此，要把地下介质的电性转化为地质情况，必需把地质、钻探、探地雷达这三个方面资料有机地结合起来，建立测区的地质—地球物理模型，才能获得正确的地下地质模式^[26]。

6. 结束语

由于各种物探方法的应用都依据一定的物理前提，且地质、地球物理条件和边界特征对测试成果具有较大的影响，使得这些方法技术存在着一定的条件性和局限性，加之大中型重点工程大多具有比较复杂的地质和工程问题，所以采用单一的物探方法一般难以查明或解决有关地质和工程问题，此时应考虑综合物探进行施测，以提高物探成果的地质解释精度和成果分析质量，满足工程之需。

但是综合物探决不是多种方法和手段的任意罗列，也不是投入的方法和手段越多越好，而应是最佳方法或手段的优化组合，使其达到“技术可靠、经济合理”，达不到这一要求的地质物探，决不能说是真正的综合物探^[27]。不同的物探方法在同一个工程项目中应用，往往可以起到互相补充相互验证的作用。如姜早峰等用高密度电法、地质雷达和地震浅层反射法在某水库坝基渗漏勘探中的应用，有效的查明了复杂地质条件下的水库渗漏原因^[28]。武彬等

通过反射波法、拆射波法、瞬态瑞雷面波勘探法、直流对称四极电测深法、联合剖面法、高密度电测深法六种物探方法在川藏公路 102 大型滑坡勘察中应用,取得了良好效果,充分表明了综合物探方法所具有的良好探查效果^[29]。

综上所述,充分利用地质、地球物理特征、配合少量的钻探、合理采用各种物探方法的组合,是发挥物探方法在地质工程中应用效果的基础,也是物探方法在地质工程领域应用和发展的方向和趋势,同时,综合物探也是克服物探方法多解性的主要途径^[30]。

参考文献:

- [1] 陈新球, 彭绪洲. 特殊条件下的物探检测及其应用效果. 地球物理学进展, 2004, 19 (4): 880~882
- [2] 韦景勤. 工程地质中的声波 CT 层析成像技术. 江苏地质, 1997, 21 (2): 111~114
- [3] 李张明, 练继建. 地震波层析成像技术探测复杂岩体结构应用研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (1): 107~111
- [4] 孙党生, 李洪涛. 井间地震波 CT 技术在水库渗漏勘察中的应用. 勘察科学技术, 2000, (5): 57~59
- [5] 杨勤海. 岩溶地质灾害勘察中井间地震波 CT 技术的应用. 勘察科学技术, 2005, (2): 59~61
- [6] 李影. 浅谈 TSP 超前地质预报在协荣隧道施工中的应用. 石家庄铁路工程职业技术学院学报, 2004, 3 (4): 14~18
- [7] 刘志刚, 刘秀峰. TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (8): 1399~1402
- [8] 刘志刚. 隧道地震勘探 tsp 在工程中的应用. 铁道建筑技术, 2001, (5): 1~4
- [9] 朱宝龙, 陈强, 魏有仪, 等. TSP 超前地质预报在圆梁山隧道施工中的应用. 水文地质工程地质, 2003, (1): 81~84
- [10] 张继奎. 浅论圆梁山隧道 TSP 地质预报技术. 隧道建设, 2004, 24 (4): 56~60
- [11] 李志祥, 何振起, 刘国伍. TSP—203 在大支坪隧道超前预报中的应用. 地球物理学进展, 2005, 20 (2): 465~468
- [12] 鲁光银, 朱自强. TSP 在公路隧道超前地质预报中的应用研究. 水文地质工程地质, 2005, (2): 101~103
- [13] 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨, 等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1662~1669
- [14] 王建军, 强建科, 李成香, 等. 高密度电法在地面塌陷勘察中的应用. 工程地球物理学报, 2005, 2(3): 232~234
- [15] 秦正. 高密度电阻率法在工程勘察中的应用. 物探装备, 2005, 15(3): 205~206
- [16] 陈泉霖, 陈新奇. 高密度电法勘察岩土工程实例. 中国煤田地质, 2004, 16(6): 52~54
- [17] 张亮国, 徐义贤. 高密度电法在沪蓉高速公路勘察中的应用. 岩土工程技术, 2004, 18(4): 187~190
- [18] 刘宾, 李洪德, 赵明杰. 高密度电法在地下防渗墙检测中的应用. 华北地震科学, 2004, 22(4): 50~52
- [19] 马爱玉, 谢向文. 高密度电测仪的发展和在黄河大堤隐患探测中的应用. 地质装备, 2004, 5(2): 15~18
- [20] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用. 地学前缘, 2003, 10(1): 171~176
- [21] 徐宏武, 邵燕, 邓春为. 探地雷达技术及其探测的应用. 岩土工程技术, 2005, 19 (8): 191~194
- [22] 何开胜, 章为民, 王国群, 等. 堤坝滑坡灾害的探地雷达应用研究. 水利水电科学进展, 2005, 25 (2): 36~39
- [23] 薛桂玉, 余志雄. 地质雷达技术在堤坝安全监测中的应用. 大坝与安全, 2004, (1): 13~19
- [24] 谭建波, 邓世坤, 李沫. 探地雷达在隧道和涵洞工程检测中的应用研究. 煤田物探, 2004, (5)
- [25] 朱向泰. 地质雷达在拟建机场隐患调查中的应用. 地质找矿论丛, 2005, 20 (增刊): 174~176
- [26] 何卫红. 综合物探在桥甫水电站岩溶渗漏调查中的应用. 西部探矿工程, 2004, (102)
- [27] 杨玉春, 刘康和. 试析综合物探的意义和作用. 西部探矿工程, 2005, (115)
- [28] 姜早峰, 王振强, 董旭光. 物探方法在水库坝基渗漏勘察中的应用. 华北地震科学地, 2004, 22 (4): 25~28
- [29] 武斌, 曾校丰. 综合工程物探技术在川藏公路 102 大型滑坡勘察中的应用. 四川地质学报, 2005, 25 (1): 61~64
- [30] 刘国辉, 李恩鹤, 张县民, 等. 综合物探方法在瀑河水库工程勘察中的应用. 物探与化探, 2004, 28 (2): 177~180

The Research Present State and Progress of New Exploration Techniques Applied to Engineering Geology

Wu Guoxiao, Yang Fenggen

College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing (210098)

E-mail: guoxiao1981@sohu.com

Abstract

This paper introduced the development of several exploration techniques. Based on the analysis of some former applied examples, the paper discussed the seismic CT, TSP, high density resistivity and GPS's application and progress in engineering geology. Then the applied regions, their advantages and shortcomings was summarized in terms of their different characters and effects in engineering geology. Furthermore, there were discussion and pretest on the direction and prospect of each method. At last, the author further analysed the integrated geophysical exploration method's effectiveness and tendency in engineering geology.

Keywords: seismic CT; TSP method; high density resistivity method; GPS; integrated geophysical exploration