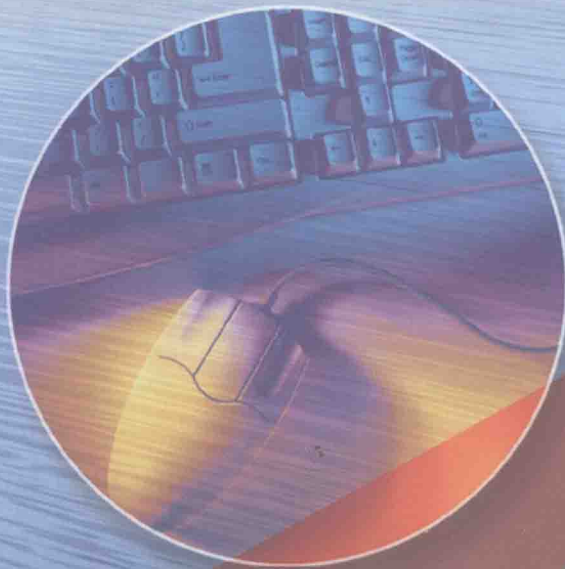


河湖水下抛石护岸工程综合物探 数值模拟与应用

HEHU SHUIXIA PAOSHI HUANGONGCHENG
ZONGHEWUTAN SHUZHIMONI YU YINGYONG

余金煌 王 强 蒋甫玉 编著



黄河水利出版社

河湖水下抛石护岸工程综合 物探数值模拟与应用

余金煌 王 强 蒋甫玉 编著

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

工程物探技术具有传统探测方法不具备的高效率、低成本的优点,越来越广泛地应用到工程中。本书主要根据生产实际以及工程物探目前的研究和发展现状,介绍了适用于水下抛石护岸工程质量检测的高密度电阻率法、探地雷达法和地震映像法。针对抛石体物理性质特点和赋存条件,通过正演数字模拟、现场试验、反演和滤波增强等技术手段,提出了河湖水下抛石护岸工程厚度和赋存状态的综合探测技术。

本书可供从事水利工程物探、水利工程质量检测的工程技术人员,以及从事地球物理专业的研究人员以及高校研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

河湖水下抛石护岸工程综合物探数值模拟与应用/余金煌,王强,蒋甫玉编著. —郑州:黄河水利出版社,2013. 11
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0626 - 6

I. ①河… II. ①余… ②王… ③蒋… III. ①护岸 - 综合物探 - 数值模拟 IV. ①TV861

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 281568 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwp@126.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8

字数:190 千字

印数:1—1 000

版次:2013 年 11 月第 1 版

印次:2013 年 11 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

随着我国经济的蓬勃发展,以及物理学、电子学和计算机科学的进步,地球物理探测技术在水利工程、地质工程和建设工程质量评价方面的应用日趋广泛。在水利工程质量评价中,高密度电阻率法、探地雷达法以及浅层地震勘探法等以高效、快速、准确以及无损为特点的地球物理方法得到了越来越广泛的重视和应用。特别是近年来国家水利事业的高速发展,为水域工程物探技术提供了较大的发展空间。

新中国成立以来,全国已建成各类水库 9.8 万多座,堤防长度 41.37 万 km。堤坝工程中波浪冲刷、地震等地质灾害作用,造成崩岸或岸坡稳定问题,需要对迎水坡及坝脚进行防护。水下抛石护岸工程由于可以就地取材,施工效率高,抛石后增强了岸坡稳定性和抗冲刷能力,在护岸工程中被广泛采用。抛石护岸工程在建设期间,工程质量检查和工程计量均需对其厚度和赋存范围实施检查。在运行阶段,抛石护岸工程受到水流的浸泡和冲刷,其质量与安全随着时间的推移亦会产生老化和损坏,需要不定期地进行检测。护岸工程检测中,抛石层所处层位和层厚是十分重要的参数:如黄河等淤积严重的河湖和水库,抛石一定时间后,由于淤积抛石层上可能覆盖其他地层,这时如需检测抛石层,首先就需探测抛石层所处的层位;抛石层的层厚是保证护岸满足安全的重要参数,因此对层厚的确定亦十分重要。

对抛石工程尺寸的探测十分重要,但限于它为水下工程,且抛石为松散体,这些特点决定了无论是采用钻孔还是物探的方法均较困难。

对抛石工程综合物探技术的研究不仅可以丰富抛石工程的检测技术,而且对水下砂层、覆盖层和软弱层的识别与厚度探测具有重要的推广价值。一方面可以丰富和完善水下复杂地质体识别技术的基本理论,提高堤防监测、岸坡监测及检测的研究水平;另一方面可以为管理部门提供科学的数据,为决策服务,节约大量的防汛经费,节约防汛期间大量的人力,且对崩岸工程重点投入,防患于未然,可减少由水毁造成的损失,节约经费开支,为设计部门提供动态数据,为类似工程的除险加固提供科学的依据。此外,一旦掌握了抛石工程的检测技术,可以及时有效地发现和预报堤坝崩岸,避免出现重大崩岸险情,为进一步研究和治理赢得宝贵时间,为防洪减灾服务,保证人民生命财产的安全。

本书根据实际生产需要以及工程地球物理目前的研究和发展现状,对适用于水下抛石工程质量评价的高密度电阻率法、探地雷达法和地震映像法的基本原理、方法技术及应用效果等有关问题进行了介绍,并相应列为五章:第一章主要介绍了工程物探技术的发展和水下抛石护岸工程的基本特征及其存在的问题;第二章介绍了高密度电阻率法的基本原理,水下抛石工程的正、反演计算及应用;第三章从地球物理场正、反演的角度介绍了探地雷达技术及其应用;第四章介绍了地震映像技术的正、反演理论及其实际应用效果;第五章概括地介绍了综合地球物理方法在水下抛石护岸工程中的应用。

本书的编写人员及编写分工如下:安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院余金煌完成了第一章和第四章,水利部淮河水利委员会王强完成了第二章,河海大学蒋甫玉完成了第三章和第五章。全书由余金煌和王强统稿。本书在撰写过程中,得到了孟繁瑾、郑宗文、杨鳌三位工程师的大力协助,并提出了宝贵建议。

由于作者水平及工作经验所限,书中难免有不当及疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 8 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 概 述	(1)
第二节 水下工程物探技术发展现状	(2)
第三节 抛石护岸工程综合物探技术	(7)
第二章 高密度电阻率法	(9)
第一节 概 述	(9)
第二节 高密度电阻率法的基本原理	(15)
第三节 高密度电阻率法的正演模拟及反演	(17)
第四节 抛石护岸工程高密度电阻率法模型	(32)
第五节 工程实例	(35)
第六节 小子域滤波技术的应用	(38)
第七节 小 结	(48)
第三章 探地雷达法	(49)
第一节 概 述	(49)
第二节 探地雷达法的基本原理	(51)
第三节 探地雷达法的正演计算	(53)
第四节 探地雷达现场试验及资料处理	(60)
第五节 水下抛石体探地雷达探测结果分析	(63)
第六节 探地雷达测试结果验证	(65)
第七节 小结与建议	(70)
第四章 地震映像法	(72)
第一节 概 述	(72)
第二节 地震映像法基本原理及方法	(73)
第三节 地震映像法的正演模拟	(77)
第四节 抛石护岸工程地震映像法模型	(82)
第五节 震源设备的研制	(86)
第六节 地震映像法野外工作方法	(88)
第七节 工程应用	(90)
第八节 地震映像法精度分析	(97)
第九节 小 结	(98)

第五章 结论与展望	(100)
第一节 结 论	(100)
第二节 展 望	(100)
参考文献	(102)
附图 1 ~ 附图 8	

第一章 绪 论

第一节 概 述

我国是世界上洪涝灾害频繁且严重的国家之一。防御洪涝灾害,减少灾害损失,关系到社会安定、经济发展和生态与环境的改善。1949 年新中国成立以来,我国在防洪减灾方面成绩斐然,各主要江河基本形成了以水库、堤防、蓄滞洪区或分洪河道为主体的拦、排、滞、分相结合的防洪工程体系,具备了防御中小洪水的能力,防洪减灾效果明显。

根据中华人民共和国水利部和国家统计局于 2013 年 3 月 26 日发布的《第一次全国水利普查公报》:全国现有的河流,流域面积 50 km^2 及以上河流 45 203 条,总长度为 150.85 万 km;流域面积 100 km^2 及以上河流 22 909 条,总长度为 111.46 万 km;流域面积 $1\,000 \text{ km}^2$ 及以上河流 2 221 条,总长度为 38.65 万 km;流域面积 $10\,000 \text{ km}^2$ 及以上河流 228 条,总长度为 13.25 万 km。现有湖泊常年水面面积 1 km^2 及以上湖泊 2 865 个。现有水库 98 002 座。现有堤防总长度为 413 679 km。这些河湖及水库的岸坡的稳定对防洪减灾的作用巨大。尽管我国在防御洪涝灾害方面做出了很大努力并取得非凡成就,但由于自然、社会和经济条件的限制,现在的防洪减灾能力仍较低,江河和城市防洪标准普遍偏低,不能适应社会、经济迅速发展的要求,防洪减灾仍是一项长期而艰巨的任务。

历史上,淮河、长江等大江大河的一些河段河势变化剧烈,曾发生多次严重崩岸、河道变迁。新中国成立以来,经过多年的护岸工程建设,强烈崩岸及河道变迁得到了一定程度的控制。目前崩岸的发生、河势的变化已趋于缓和,但由于防护标准不足、部分河道整治工程未实施,局部河势未能得到有效控制,崩岸险情仍时有发生。据统计,长江干流安徽段现共有崩岸 76 处(其中 2002 年以来新增崩岸 17 处),崩岸区总长度为 418 km。崩岸发生的主要原因是堤基土层强度过低,抗滑能力弱,在外部诱因作用下,边坡易滑塌。对于砂性土均一结构的岸坡及上黏性土下砂性土结构的岸坡,其崩岸一般发生在汛期;对于黏性土均一结构的岸坡,其岸坡失稳一般发生在汛后退水阶段,此时江河水位下降,岸坡中的地下水位较高,由于黏性土透水性较弱,土中水位下降的速度远小于江河水位下降的速度,岸坡土体在自身位场和孔隙水压力的共同作用下失稳下滑,形成崩岸。崩塌大多数发生在水利水电工程附近。它们毁坏水渠管道,破坏堤坝、水电站、变电站以及其他设施。崩塌体落入水库中常造成水库淤积,有时甚至激起库水翻越大坝冲向下游造成伤亡和损失。有些崩塌还可以造成水库报废。总之,崩塌常常破坏水利水电工程,使其不能正常运营,造成经济损失。

对岸坡失稳的加固处理,水下抛石由于可以就地取材、施工效率高,抛石后可以增强岸坡稳定和抗冲刷能力,在护岸工程中被广泛采用。抛石护岸工程在建设期间,工程质量检查和工程计量均需要对其质量及相关尺寸进行检查。在运行阶段,抛石护岸工程受到

水流的浸泡和冲刷,随着时间的推移亦会产生老化和损坏,因此需要不定期地进行检测。在护岸工程的检测中,抛石层的所处层位和层厚是十分重要的参数,例如黄河等上淤积严重的河湖和水库,抛石一定时间后,由于淤积抛石层上可能覆盖其他地层,这时如需检测抛石层首先就需探测抛石层所处的层位;抛石层的层厚是保证护岸满足安全的重要参数,因此对层厚的确定亦十分重要。

对抛石工程综合物探技术的研究不仅可以丰富抛石工程的检测技术,而且对水下砂层、覆盖层和软弱层的识别及厚度探测具有重要的推广价值。一方面可以丰富和完善水下复杂地质体识别技术的基本理论,提高堤防监测、岸坡监测及检测的研究水平;另一方面可以为主管部门和管理部门提供科学的数据,为决策服务,节约大量的防汛经费和人力,且对崩岸工程重点投入,防患于未然,可减少由水毁造成的损失,节约经费开支,为设计部门提供动态数据,为类似工程的除险加固提供科学依据。此外,一旦掌握了抛石工程的检测技术,可以及时有效地发现和预报堤坝崩岸,避免出现重大崩岸险情,为进一步研究和治理赢得宝贵时间,为防洪减灾服务,保证人民的生命财产安全。

第二节 水下工程物探技术发展现状

抛石护岸工程由于具有抛石结构松散、孔隙大、粒径和分布不均匀等特点,采用传统的钻探方法十分困难。这些方法由于水上操作平台搭建费时费力且具危险性,一般测点布置较少,难以确定地质体的分布范围。随着工程物探技术的发展,对抛石护岸工程层位和层厚探测技术的研究已越来越多地使用物探方法。

一、工程物探概念

物探是地球物理勘探的简称,是以不同岩土间物理性质的差异为物质基础,利用物理学原理,通过观测和研究地球物理场的时空分布规律来解决地质问题的方法,其主要工作特点是通过采集目的体的物理性质参数数字化信息,最终使用专用软件处理、解译,以获取相关成果图像,因此这种勘探技术亦称为数字成像技术。按照勘探对象的不同,物探技术又分为三大分支,即石油工程物探、固体矿工程物探和水工环境工程物探(简称工程物探)。

工程物探技术方法门类众多,它们依据的原理和使用的仪器设备也各有不同。随着科学技术的进步,工程物探技术的发展日趋成熟,而且新的方法技术不断涌现,几年前还认为无法解决的问题,几年后由于某种新方法、新技术、新仪器的出现迎刃而解的实例是常见的。它不仅是地质科学中一门新兴的、十分活跃、发展很快的学科,还是工程勘察的重要方法之一。从某种程度上讲,它的应用与发展已成为衡量地质勘察现代化水平的重要标志。

二、常用工程物探方法及特点

目前,常用的工程物探方法主要有电法勘探、探地雷达、地震勘探、弹性波测试、层析成像等。

(1) 电法勘探:包括电测深法、电剖面法、高密度电法、自然电场法、充电法、激发极化法、可控源音频大地电磁测深法、瞬变电磁法等。

(2) 探地雷达:可选择剖面法、宽角法、环形法、透射法、单孔法、多剖面法等。

(3) 地震勘探:包括浅层折射波法、浅层反射波法和瑞利波法。

(4) 弹性波测试:包括声波法和地震波法。声波法可选用单孔声波、穿透声波、表面声波、声波反射、脉冲回波等,地震波法可选用地震测井、穿透地震波速测试、连续地震波速测试等。

(5) 层析成像:包括声波层析成像、地震波层析成像、电磁波吸收系数层析成像或电磁波速度层析成像等。

这些方法具有无损、不可代替、探测深度大、快速、经济等特点,能解决其他方法难以解决的问题。随着物探技术的进步,这些方法越来越受到工程技术人员的重视,已成为一种不可或缺的手段、工序和程序。

三、工程物探的发展

工程物探作为水文地质、工程地质和环境地质勘探的主要方法之一,在中国的应用始于 1951 年,首次工作是由中国著名地球物理学家顾功叙先生率领电法组,在北京石景山地区,进行地下水资源勘测研究。初期,在我国有铁道、水电及地矿系统建立工程物探队伍。1954 年铁道系统在宝成铁路应用电法进行路基勘察;1955 年水电系统在永定河模式口水电站,应用电法了解坝基工程地质问题;1956 年地矿系统在长江三峡工程勘测中,应用电法勘测坝区工程地质问题。20 世纪 60 年代以来工程物探才得到较普遍的发展,除上述各系统外,还在建设、冶金、煤炭、石油、核工业、机械电子、兵器、航空航天及船舶等系统,以及在农业、商业、纺织、化工及文化(考古)等系统也得到了发展。到 70 年代后期,各有关高等院校和科研单位,也相继开展了工程物探工作。目前,在中国从事工程物探的工作人员近万人,队伍较分散,但开展的技术方法较多,应用范围较广,效益较好。80 年代中期,中国加强了沿海城市和开发区的建设,工程物探随着城市建设和市场经济的发展,呈现了高速发展的趋势。原来从事固体矿产勘探工作的一些物探队伍,为适应经济发展的需要,也开展了工程物探工作。工程物探应用的技术方法可分为航空物探、地面物探(包括水域)和地下物探三大方面,其中地面物探采用电法、地震、重力、磁法、放射性、声波、探地雷达及水声勘探等方法。这些方法主要用于工程规划选点、可行性研究、初步设计、技术施工设计及工程运行各个阶段的水文地质、工程地质及环境地质勘察。80 年代,我国改革开放、加速基本建设、建立经济特区和开放沿海港口城市,推动了能源、交通和城市基本建设工程物探的发展。在这期间以水电、铁道、地矿、冶金等部门为主,包括各部门各地区发展了工程物探队伍,引进和自行开发大批工程物探仪器,吸收了大量物探专业大学生和研究生,技术装备和技术水平有了很大的提高。电法在结合电算技术之后,以新的面貌继续发挥作用;浅层地震、地质雷达和桩基检测管线检测方法大大丰富了工程物探技术;工程质量检测以及为已有建筑物现状及隐患探查而发展了物探技术,这一时期是我国工程物探成长和提高了的重点时期。90 年代,我国进一步改革开放,制订“九五”计划和面向 21 世纪长远规划,进一步推动了能源、交通和城市基本建设工程物探的发展。按

照联合国减灾 10 年规划要求,物探技术将在减灾领域发挥作用。根据 1992 年联合国在巴西召开的环境与发展首脑大会制定的巴西宣言和我国政府大力抓环境治理与保护的精神,我国逐步开展了环境物探。近 50 年来,我国水资源、工程物探完成了大量的工程,技术能力有了很大提高,资料处理技术也有了极大的发展,目前技术总体上处于国际先进水平,并开始工程物探技术输出和仪器设备出口。

四、工程物探的应用与效果

工程物探在国际上的起步可追溯到 20 世纪 20 年代,但在 70 年代末,它才发展到可以与固体矿产物探相比的程度。根据在世界范围投资规模的统计,仅在 1976 ~ 1979 年,工程物探的总投资就由 880 万美元上升到 2 200 万美元,三年间增加两倍多,其投资低于石油和固体矿产物探,居于应用地球物理的第三大领域。同期,美国对工程物探的投资由 76 万美元上升到 957 万美元,增加 12 倍多,超过固体矿产物探,成为美国应用地球物理的第二大领域。据日本物理勘察协会的统计,1978 年在日本的物探工作项目有 1 200 个,与水文地质和工程地质有关的占 980 个。日本工程物探的工作项目居于其他物探的首位。

为适应工程勘察任务广泛的需要,各国工程物探开展了许多技术方法。美国陆军工程师团水道试验站(WES)于 1979 年报导,开展工程物探的技术方法有 42 种,其中地面物探方法 12 种,地下物探方法 30 种;处于研究和试用阶段的有 15 种,用于生产的有 27 种。由于任务要求和方法适应条件的不同,对各种技术方法的应用情况也不同。据日本物理勘察协会统计,在 1967 ~ 1979 年日本对工程物探各种技术方法的应用情况是:地震勘探占全部物探工作的 52%,振动测试占 20%,测井占 12%,电法占 8%,磁法占 5% ~ 7%,其他占 2% ~ 3%。

中国工程物探在 50 多年的发展中,锻炼成长了一支有水平的技术队伍,完成了大量艰巨而重要的工作任务。在地下水资源开发和工程勘察等方面做出了应有的贡献。

五、水下工程物探研究现状

近几十年快速发展起来的水域地球物理勘探技术(测深技术、旁侧声纳技术和浅地层剖面测量技术等),为获取水下地质体信息提供了强有力的手段。目前,常用于水域工程与海洋地质调查的地质体识别方法主要有水声测量、旁侧声纳、浅部声波地震勘探、高分辨率地震及磁力测量等。

水声测量法是一种运用回声测深技术来了解水底深度变化,从而得出水下地形地貌特征的方法。它通过测深仪器连续精确地记录每条测线上的水深变化,得出水底地形剖面图,经过对记录资料的整理与潮汐、点位等的改正,可以勾画出调查区的水下地形图。但由于反射系数较大,会产生二次或三次波,探测精度会受到影响。如果卵砾石粒径大于 2 cm 或存在卵砾石层,则会产生散射现象,不易得到下部地层的记录。旁侧声纳是通过声波换能器不断向水下发射声波扫描信号,并接收水底反射回来的信号,通过图像处理,即可对水底成像。它通过识别色调变化,获取水底微地貌与粗糙度的变化,并可获取水底异常物(如沉船等)的分布位置。浅部声波地震勘探法主要用来识别水下浅部疏松沉积层

的结构、分层与地质构造等情况;其原理与常规的地震勘探类似。震源通常采用电、声的脉冲(由电脉冲转变成声脉冲),也有采用电火花震源。接收装置是水听器,工作时震源系统与接收系统对称地拖曳在船尾的两侧。地层的反射信号直接由记录仪器打印出来,记录的剖面是一种模拟地震剖面。它较真实地反映了一定深度内浅度地层的结构与构造面貌、沉积特征及岩土工程不稳定性方面的情祝。浅地震剖面法在工作时选用频率比较高,一般为 200 ~ 4 000 kHz,因此对地层具有较高的分辨率。由于地层的滤波作用,高频信号在地层中衰减较快,这就影响了浅地震法的穿透深度。磁力测量法在水域工程及工程地质调查中主要用来了解水下或浅部沉积层中具磁性物体引起的异常或松散沉积层下的基岩地质构造情况。它是根据磁性物体在背景磁场中产生的剩余异常来识别那些具磁性的障碍物(如大型沉船及水下废弃建筑等)与疑存物(如磁性的爆炸物体、水下电缆及各种残件与杂物等),或是根据磁场与磁异常特征来了解基岩中的地质构造情况,它在工程危险区与工程地质构造稳定性的评价方面都是一种十分有用的调查手段。

地震映像法是一种非常有效的水域工程物探新方法,它利用了水中无面波干扰的特点,采用了小偏移距与等偏移距、单点高速激发,单点接收或多点接收,经过实时数据处理,以大屏幕密集显示波阻抗界面的方法形成彩色数字剖面,再现地下结构形态。早在 20 世纪 50 年代,地震勘探资料数字处理的基本理论就已经开始萌芽。1953 年 N. Ricker 第一个提出了地震子波概念,他研究了地震子波的传播形式和规律,指出了地震子波对地震记录分辨率的控制作用;随后人们引入了一维合成地震记录的褶积模型。70 年代开始发展高分辨率地震探测技术。在震源、接收和记录系统以及数据处理等方面做了大量的研究和开发工作。90 年代初,法国、美国等先后开发了 SN388 L/O SYSTEM II VISION 等型号新一代多道遥测地震仪和 Delph 单道地震仪。这些仪器具有动态范围大、频带宽、振幅精度高、道数多等优点,仪器的自动化程度也越来越高。在震源研究方面,美国开发了高 B/P 值的套筒枪和 G. I 枪系统,同时高灵敏度、高频检波器也得到了广泛应用。在这些技术的支持下,美国西方地球物理公司、EG&G 公司等在海区获得了高分辨率的地震剖面。在地震资料处理方面,近年来推出的 Omega、Promax 和 Focus 等处理系统,融合了西方地球物理公司的先进技术,拥有全三维处理、自动去噪、输出零相位子波反褶积等多种特殊处理能力。另外,这些软件充分利用了计算机的图形图像功能,使得可视化交互能力得到不断加强。在地震资料解释方面,Landmark、GeoQuest、阿特拉斯以及 GeoGraphix 公司的解释系统是目前世界上较先进的解释软件。我国在水域勘测方面,“八五”期间,原地矿部和中国海洋石油总公司在引进国外高分辨率地震设备的基础上,针对我国海上的地质情况,在改进采集技术和处理方法方面做了大量的研究试验工作。1990 年 5 月,渤海石油物探公司滨海 511 物探船承担了西方公司约 1 500 km 的海上浅水高分辨率勘探的合同,这是我国最早进行海上高分辨率勘探的单位之一。“九五”期间,石油天然气总公司把“高分辨率地震勘探技术”列为重点科技攻关项目,使 2.0 s 的反射波主频达 120 ~ 150 Hz,能分辨 5 m 或 4 m 厚的地层,使 3.0 s 的反射波主频达 80 ~ 100 Hz,能分辨 9 ~ 10 m 厚的地层,都已取得了一定的成果。经过 30 多年的发展和研究,特别是各种水上震源的发展,如空气枪、蒸汽枪、水枪、电火花等非炸药震源以及机械式全自动冲击振源应运而生,很好地解决了水域上一直困扰的气泡效应问题,且多次反射也得到了一定程度

的抑制,这使得水域地震映像法的技术进一步完善。因此,水域高分辨率地震虽然起步较晚,但进步很快,已经达到相当高的水平。

地质雷达作为一种新兴探测技术(英文名称 Ground Penetrating Radar,简称 GPR)主要用于探测领域。该技术由一项德国科学家研究地理特性时的专利技术发展而来。这种雷达不仅能迅速,还能无损害地探测地质结构以及隐藏在地下的各种非金属或金属目标物,因此近年来引起了人们极大的关注。随着半导体技术、无线电技术水平的发展,地质雷达探测技术也日渐成熟,并逐渐体现出了其广阔的应用前景和巨大的市场价值。地质雷达探测技术通过被探测对象对高频电磁波的反射来对其结构特征进行测定,该技术可追溯到 20 世纪初。德国 Hulsmeier 于 18 世纪初第一次用电磁波对地下金属物进行探测,但直到 1910 年,Lowy 和 Leimback 以专利的形式提出地质雷达设想。Hulsenbeck 于 18 世纪 30 年代指出,任何电介质的变化都会使电磁波在交界面产生反射,并第一次提出运用电磁波反射来推测地下介质结构的思想。但是由于地下介质种类繁多,并且对电磁波的衰减较大,电磁波在地下传播十分复杂,加之半导体、计算机技术发展水平的局限性,地质雷达探测技术的应用也受到了不同程度的限制,直到 1960 年左右才出现了有一定使用价值的地质雷达。只是初期的地质雷达探测仅限于对波吸收稍弱的冰层、盐层和煤矿等介质中。20 世纪 60 年代末、70 年代初,电子技术的发展和美国阿波罗月球表面探测试验的成功开展,使地质雷达技术的发展有了划时代进展,为该技术的广泛应用注入了新鲜血液。总体上说,地质雷达技术的发展过程有以下三个阶段:

第一阶段:试验阶段。从 20 世纪 70 年代初期到 70 年代中期,美、日、加等国都在大力研究,英、德也相继发表了论文和研究报告。1972 年,第一个地质雷达设备制造公司(Geological Survey System Inc.)宣告成立。此后,岩土工程地质勘察的某些领域才逐渐实现真正的快速、无损地质雷达探测。

第二阶段:实用化阶段。从 20 世纪 70 年代中后期到 80 年代,半导体材料、微电子和计算机技术得到不断发展,地质雷达相关产品逐一问世,如加拿大 SSI 公司的 EKKOGPR 系列、美国 GSSI 公司的 SIR 系列、日本 OYO 公司的 YLRZ 系列等。80 年代全数字化 GPR 的推出,为地质雷达的发展翻开了新的一页。它在传统的 GPR 基础功能上,扩展提高了数据实时处理分析能力,并便于数据的进一步处理。此外,GPR 的功能扩展大大提高了其应用潜力与领域。

第三阶段:完善和提高阶段。从 20 世纪 80 年代至今,GPR 技术突飞猛进。全球出现了许多地质雷达研究机构。同时,地球物理和电子工程界对地质雷达天线改进、信号处理以及地下目标成像等方面提出了许多新见解。进入 21 世纪以后,地质雷达更是广泛应用于铁路、考古、公路、地质勘探和市政设施维护等各领域,用以解决地质构造、超前预报、病害诊断、工程质量检测和场地勘察等问题。

国内的地质雷达研制工作于 20 世纪 70 年代中期起步。中国煤炭总院重庆分院高克德教授所在的地质雷达专题组研制开发出的 KDL 系列用于矿井防爆的地质雷达仪,开创了我国自主研制地质雷达的先河。1983 年,SIR-8 作为首台地质雷达仪器由铁道部引进,并且从 80 年代中期开始,关于地质雷达技术的研究和试验逐步开展起来。80 年代末 90 年代初,国内地质雷达仪器研制水平的极大提高和国外先进仪器的引入,使我国在该

领域也取得了突出成绩,并且研制出了地质雷达试验系统。部分研究部门也推出了他们的研究成果,如中国科学院长春地理所推出的 SI2R 和东南大学推出的 GPR-I 等。20 世纪 90 年代末和 21 世纪初,因国内煤炭发展需要,由中国矿业大学(北京)彭苏萍教授组织成立了仪器项目开发项目组,开始着手地质雷达的研制与开发,并于 2004 年开发出具有自主知识产权的地质雷达产品。地质雷达在硬件方面发展日趋完善,生产厂逐渐把研发重点指向数据采集速率和信噪比的提高以及软件智能化。在地质雷达硬件设备、目标信号提取、目标识别和目标成像等方面取得显著成果,尤其是成功实现了地下目标三维层析成像,极大地提高了分辨率和清晰度,使我国地质雷达技术在信号处理和成像领域进入了世界领先行列。在今后的发展中,研发采集数据质量高、抗干扰能力强、探测能力强、采集和处理速度快、分辨率高、能保存原始数据又轻便经济的地质雷达系统核心是发展方向,以满足我国公路隧道建设与质量监督的迫切需要。

六、存在的问题

(1) 传统的钻探、静探等方法虽然能够对水下地质体的分布范围和厚度进行识别,但存在施工难度大、工期长、信息不连续、具有破坏性等缺点。

(2) 水声勘探法可以有效地勘探水下地形地貌以及薄淤泥层的厚度,但对抛石等较厚的复杂地质体,由于反射系数较大,会产生二次或三次波,其识别精度会受到影响。若卵砾石粒径大于 2 cm 或存在卵砾石层,则会产生散射现象,不易得到下部地层的记录,因此无法应用于厚状水下复杂地质体的识别。

(3) 高密度地震映像法能够较好地对水下复杂地质体的厚度进行识别,但其一方面无法划分波阻抗相近的地质体层位;另一方面受水深的影响,其对水深小于 4.5 m 的地质体的识别效果很差。

(4) 目前水域地震震源有电火花震源、空气枪震源、地震枪震源、冲击震源以及炸药震源。这类震源大都存在气泡效应、频带窄、余震长、冲击能量和频率不可调节等问题,且仪器笨重,不利搬运。

第三节 抛石护岸工程综合物探技术

水下抛石工程除具有结构松散、孔隙大、粒径和分布不均匀等特点外,其层厚小至几十厘米,大至几十米,赋存深度亦是如此,尤其是对已抛石时间长、淤积严重的工程,在厚度检测前首先还需要探测抛石层所处的层位。基于抛石工程的结构和工程特点,如选用单一物探方法进行探测,则无法实现层位的最终和厚度的检测,而应采用综合物探法对其进行探测。

一、综合物探

综合物探可以根据不同物探方法对应的物理性质,有针对性地选取几种物探方法技术组合,互相印证、互相补充,这样既能够有效地提高物探成果的地质解释精度和成果分析质量,又可满足工程勘察的需要。所谓综合物探,不仅仅是不同方法的综合(如本书主

要研究高密度电法、高密度地震映像、探地雷达三种方法的组合),还包括同一种方法不同勘察方式的综合(如高密度电法的 α 、 β 等的排列的组合)。但是,综合物探绝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。在组合时应该仔细抓住勘探要求(如目标层深度、勘探精度等),用不同的方法去反映不同的物性,从多个角度来验证结论的可靠性,从而得到所勘察目标的信息。

二、物探方法的选取

高密度电阻率法、探地雷达法和高密度地震映像法具有以下特点:

(1)高密度电阻率法仍属于电阻率法的范畴,但其具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点。它广泛应用于地层划分、探测隐伏断层构造,岩溶空洞、采空区、地质滑坡体等工程勘察,但高密度电阻率法在深度方向上的分辨率较差。

(2)探地雷达法是工程勘察中的一种高科技方法,虽然其探测深度较浅(陆地上数米至数十米,在水上探测时由于水的吸收作用探测深度显著降低),但波长为分米数量级,且可进行拖动天线式的连续剖面测量,因而有较高的垂直分辨力和水平分辨力,特别适合于浅层、极浅层的目的层勘探。它可与高密度地震映像法在探测深度上形成组合,互为补充。

(3)高密度地震映像法是一种非常有效的水域工程物探新方法,它利用了水中无面波干扰的特点,采用了小偏移距与等偏移距、单点高速激发、单点接收或多点接收,经过实时数据处理,以大屏幕密集显示度阻抗界面的方法形成彩色数字剖面,再现地下结构形态。它是在野外施工操作类似地质雷达的方法,但是勘探深度远比探地雷达的勘探深度大。高密度地震映像用于水域,需配套连续冲击船。在水域勘察可以连续对水下地形和地层构造进行扫描,日作业率在10 km以上。但是高密度地震映像法在水上使用,水深应使水底反射达到检波器的时间大于子波的长度,这就决定了水深较浅时无法使用。

基于抛石护岸工程的结构和工程特点、探测的目的,以及上述三种方法的特点和适用性,本书选取的方法组合为:利用高密度电阻率法探测抛石层层位,利用探地雷达法和高密度地震映像法组合探测不同赋存深度的抛石层的层厚。

第二章 高密度电阻率法

高密度电阻率法(High-density Resistivity Method)是以地下被探测目标体与周围介质之间的电性差异为基础,利用人工建立的稳定地下直流电场,依据预先布置的若干道电极可灵活选定装置排列方式进行扫描观测,研究地下大量丰富的空间电性特征,从而查明和研究有关地质问题的一组直流电法勘探方法。

高密度电阻率法又是一种阵列勘探方法,野外测量时只需将大量电极(几十至几百根)置于测点上,利用程控电极转换开关和微机工程电测仪,便可实现数据的自动快速采集。将测量结果输入计算机后,通过对实测资料的自动反演处理和直观的图示方法,可反映出地下地电断面不同深度各地层的电性特征。

第一节 概 述

一、高密度电阻率法的发展

电阻率法勘探的研究始于 19 世纪初期,1815 年首先在英国康瓦尔铜矿上观察到了由铜矿产生的天然电流场,当时仅限于科学研究,还没有实际应用。到了 20 世纪为了适应工业发展的需要,矿产资源的开发和科学技术的进步促使电阻率法勘探方法产生并应用到生产实际中。电阻率法勘探是地球物理勘探中的重要方法之一。它是以岩土体的电性差异为物理基础的。电阻率法勘探从产生至今,得到了广泛的应用并且经过 80 余年的实践和创新,已经形成了一个理论比较完善、方法多样的地球物理勘探方法。但是,通过常规电阻率法获得的信息量很少,所提供地电断面中能够反映地质结构特征的信息极为贫乏,无法对其进行统计处理和解释。近年来,随着数理方法的不断进步和计算机技术的发展,对大量的数据进行处理并反演成为可能,另外电阻率法勘探的专家们不断探索新的方法,来解决更加复杂的电阻率法勘探的问题。高密度电阻率法的提出和付诸实施使电阻率法勘探也可以和地震勘探一样采用覆盖方式更快、更准确地采集信息,更高精度地进行多维反演,使电阻率法解释资料更加直观、明了,可以说这一新技术的出现是电阻率法勘探的一大进步。20 世纪 80 年代后期,我国地矿部系统率先开展了高密度电阻率法及其应用技术研究,从理论与实际结合的角度,进一步探讨并完善了理论及有关技术问题。近年来,该方法先后在工程地质调查、坝址及桥墩选址、采空区、岩溶区及地裂缝探测等众多工程勘察领域取得了明显的效果。事实上,高密度电阻率法主要是一种阵列式勘探方法思想。阵列电探思想早于 70 年代末有人开始考虑实施,英国学者所设计的电测深偏置系统实际上就是阵列电探的最初模式。80 年代中期,日本地质计测株式会社曾借助电极转换实现了阵列电探的野外数据采集。采用重叠单极—偶极观测系统的高分辨电阻率法是由美国的地球物理工作者提出的,起初用于探测军事方面的洞体,后应用于探测废矿巷

道、岩溶等地下洞穴。美国西南研究所研制出快速高分辨地电阻率资料采集系统(ER-DAS),用来采集重叠单极—偶极高分辨电阻率资料。我国吉林大学工程技术研究所也最先研制开发出了多道分布式高密度电法采集系统,并在实际工程中有了广泛的应用。高密度电阻率法数据采集方式是分布式的,进行野外测量时只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,测点密度远较常规电阻率法大,一般为1~10 m。然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换开关上。电极转换开关是一种由单片机控制的电极自动转换装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式、极距及测点的转换。测量信号用电极转换开关送入电法仪主机,并将测量结果依次存入存储器。将测量结果导入电脑后,可对数据进行各种处理,给出地电断面分布的各种图示。

二、高密度电阻率法的应用情况

国内高密度电阻率法应用领域也较广,据不完全统计,主要有:徐义贤、董浩斌等(2000)使用高密度电阻率法对树根分布情况进行探测,从而提出对名优树种进行科学施肥的方案;王玉清等(2001)在高层建筑选址工作中应用高密度电阻率法,对区内浅层溶洞的平面分布情况和空间展布形态,从环境地球物理角度对工程选址及地基处理提出了合理的建议;刘晓东等(2002)将高密度电阻率法用在岩溶灾害调查中用于划分可溶岩区、勘察基岩断裂构造、了解基岩岩溶发育情况等方面;余京洋等(2006)利用高密度电阻率法监测地下介质污染;宋洪柱等(2007)使用高密度电阻率法探测古墓,认为高密度电阻率法在古墓探测中是一种简单、易行、高效的方法;周俊龙等(2008)用高密度电阻率法在红卫水库检测土石坝隐患,发现采用高密度电阻率法检测土石坝缺陷是一种成本低、效率高、切实可行的好方法;罗有春等(2008)使用高密度电阻率法探测防空洞,实例分析表明,该方法对测定防空洞有较好的效果,且具有成本低、效率高、测试简便等优点;汤谨晖等(2008)将高密度电阻率法应用在某路基岩溶区勘察中,提供的数据丰富、效率高、可靠性好、速度快,是灰岩地区寻找土洞、溶洞及构造破碎带最有效的物探方法之一;唐英杰等(2008)用井间高密度电阻率成像法检测深孔帷幕注浆效果;汪新凯等(2008)用高密度电阻率法探测土堤(坝)渗漏,探测渗漏在土堤(坝)中的赋存形态,结合资料分析和现场情况调查,确定渗漏部位的方法,为土堤(坝)的安全鉴定和除险加固提供参考;陈则林等(2008)用覆盖式高密度电阻率探测系统探测堤防隐患,结果表明,该方法在千里堤文安堤段隐患探测中具有较好的应用效果,且具有探测速度快、精度高等优点;原文涛等(2008)用高密度电阻率法探测煤层采空区,以寿阳煤层采空区探测为例,说明高密度电阻率法是寻找煤层采空区的一种行之有效的方法,高密度电阻率法数据采集方式是分布式的,进行野外测量时只需将全部电极设置在一定间隔的测点上;丘广新等(2008)使用高密度电阻率法探测排水管渠,应用实例充分阐述了采用高密度电阻率法探测排水管渠的可用性、可靠性,为地下管线探测技术提供了新的选择。高密度电阻率法在国外也广泛应用,如:使用拖曳式电极对湖底、浅海海底电阻率分布进行研究,堤坝隐患探测,地下水探测,隧道开挖方案确定(尽可能寻找软土层位),污染物侵蚀分布情况探测,岩溶探测等。高密度电阻率法的应用范围十分广泛,只要目标体与背景之间存在电阻率差异,同时